実世界に基づいたプロシージャル

～植物分布のプロシージャル生成～

永友瑛里子

自己紹介

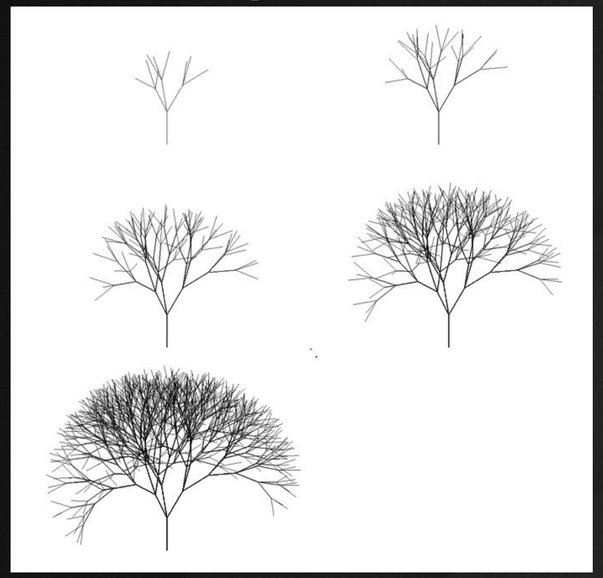
永友 瑛里子

経歴：

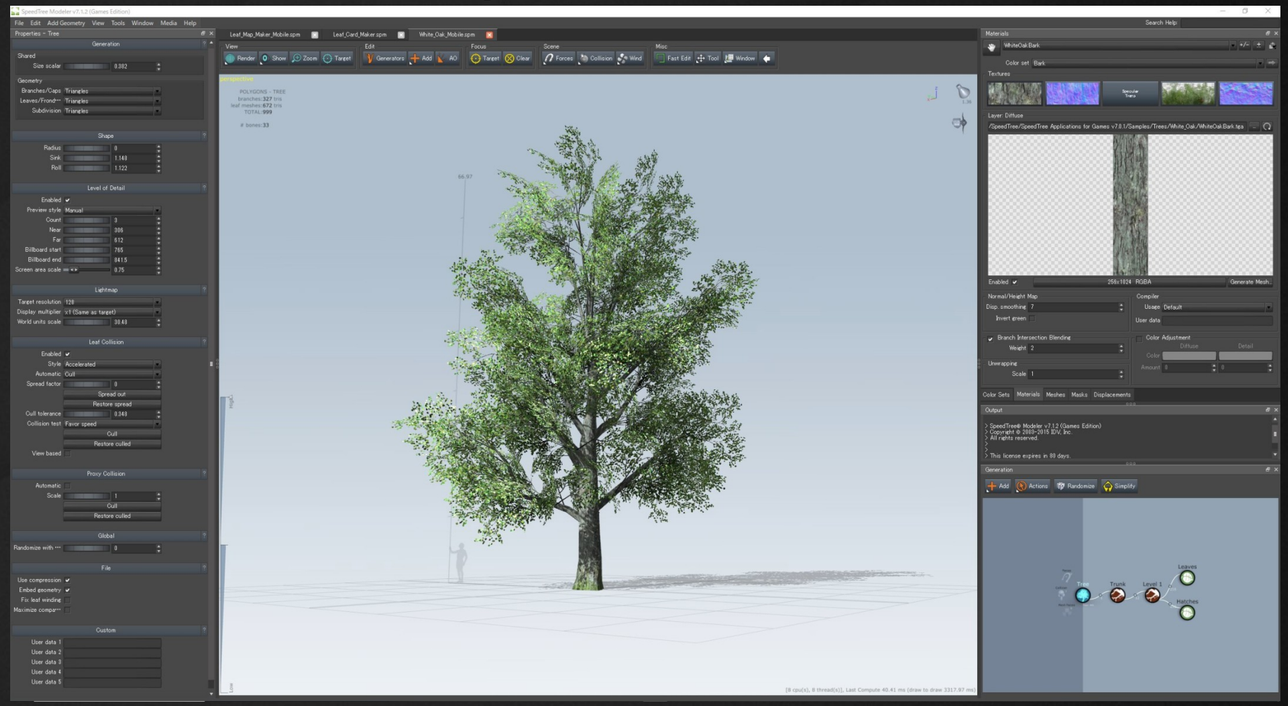
2017 年株式会社ポリフォニー・デジタル入社景観デザインチームにて、データ制作やアーティスト制作環境の改善などを行っています。

□□□□□□□□□□□□

L-System



SpeedTree

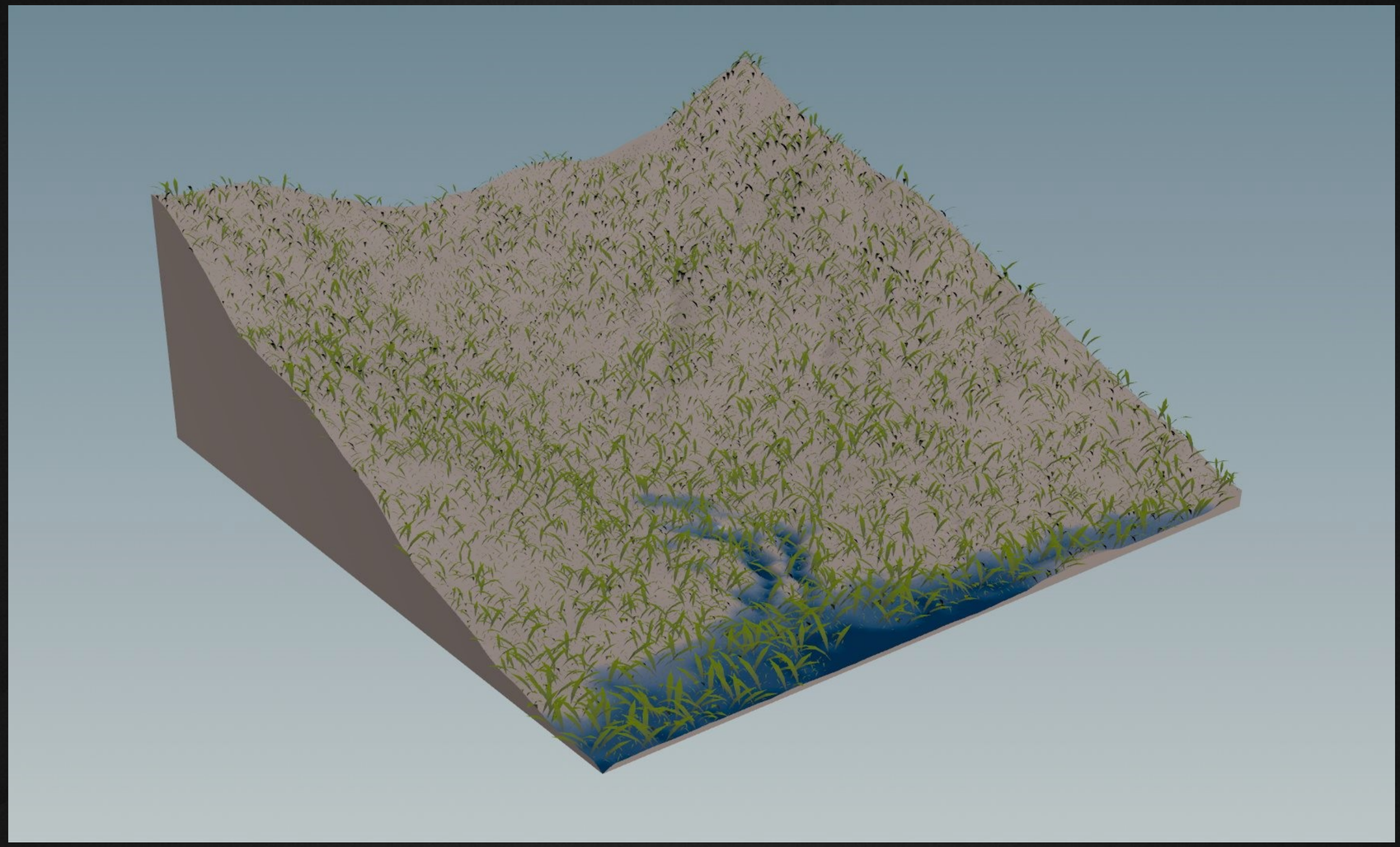


POLYPHONY™ DIGITAL

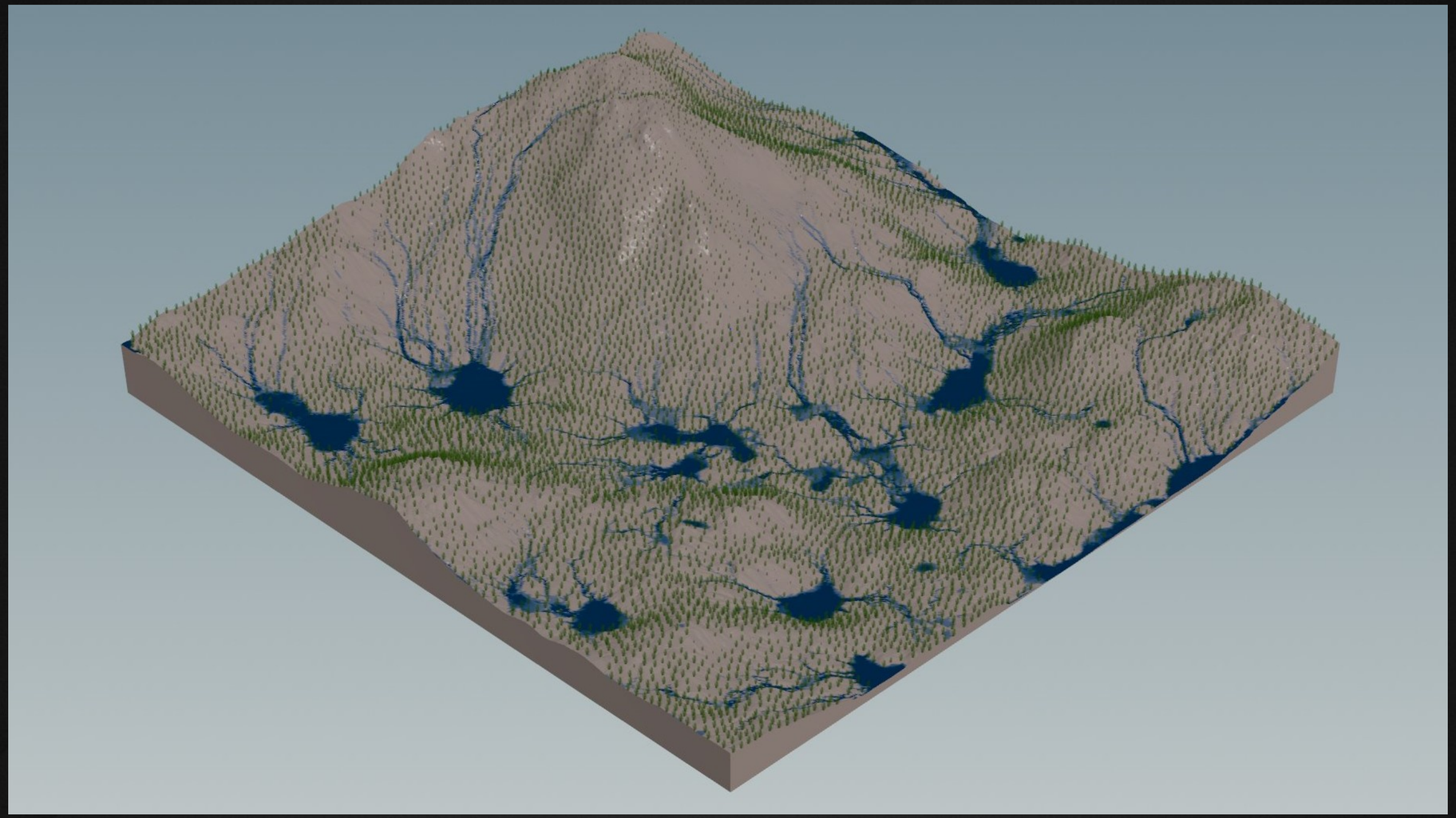
既存の植物自動配置ツール

ペイント的に植物を配置するものではなく “ 正しく”植物が自ら成長し、
植生が再現されるシミュレーション

我々が望むもの



最終的に得られたもの

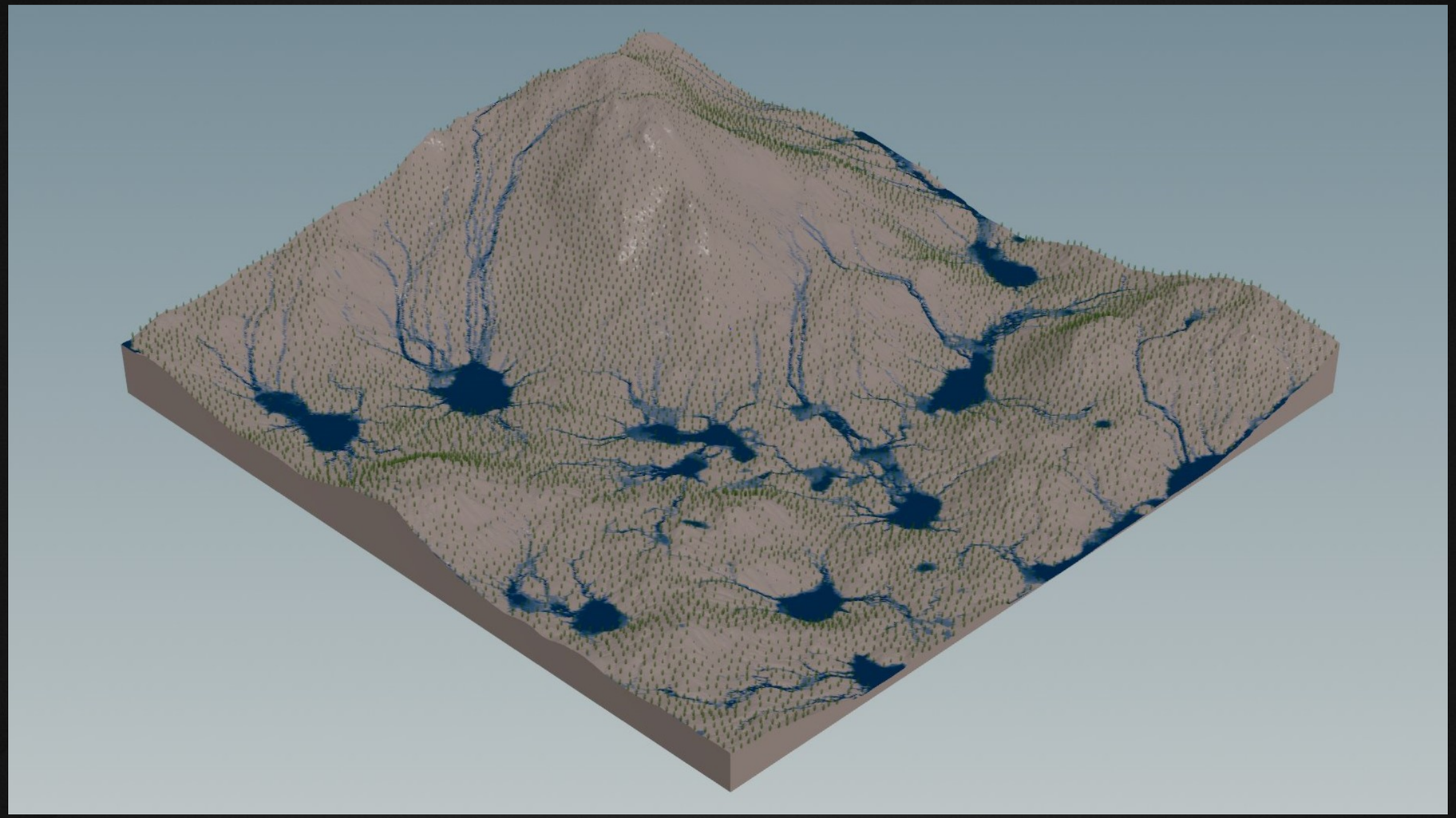


成長式のみの実装

参考文献　　片岡孝義．(2010)．植物物理学の基礎．養賢堂．

POLYPHONY™ DIGITAL

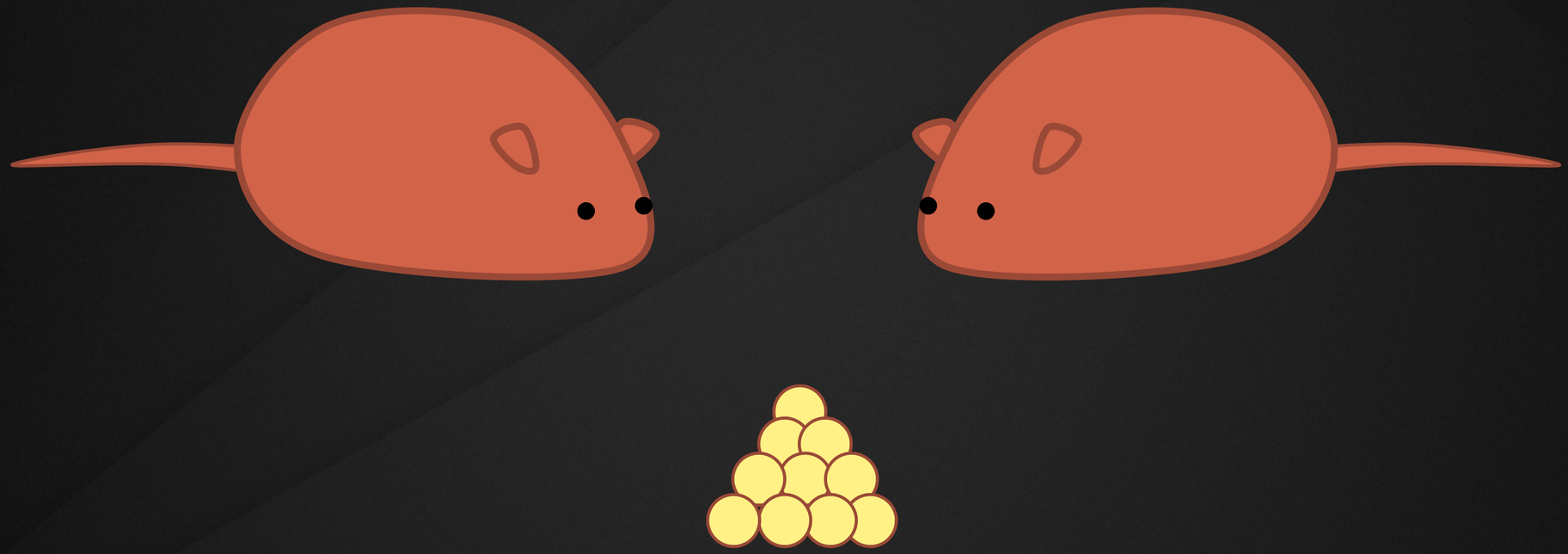
成長式のみでのパラメータ変化例



参考文献 片岡孝義. (2010). 植物物理学の基礎. 養賢堂.

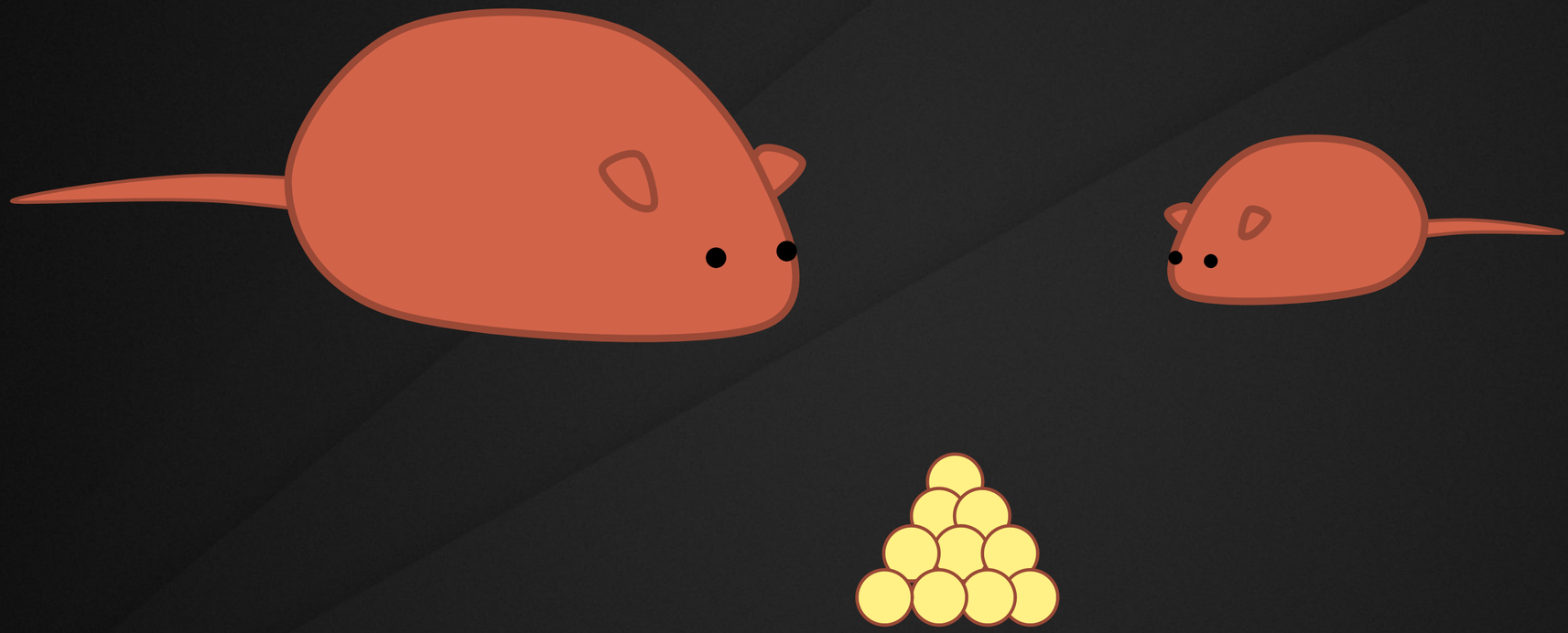
なぜ成長式のみでは不自然なのか？

何か見落としている要素がある？



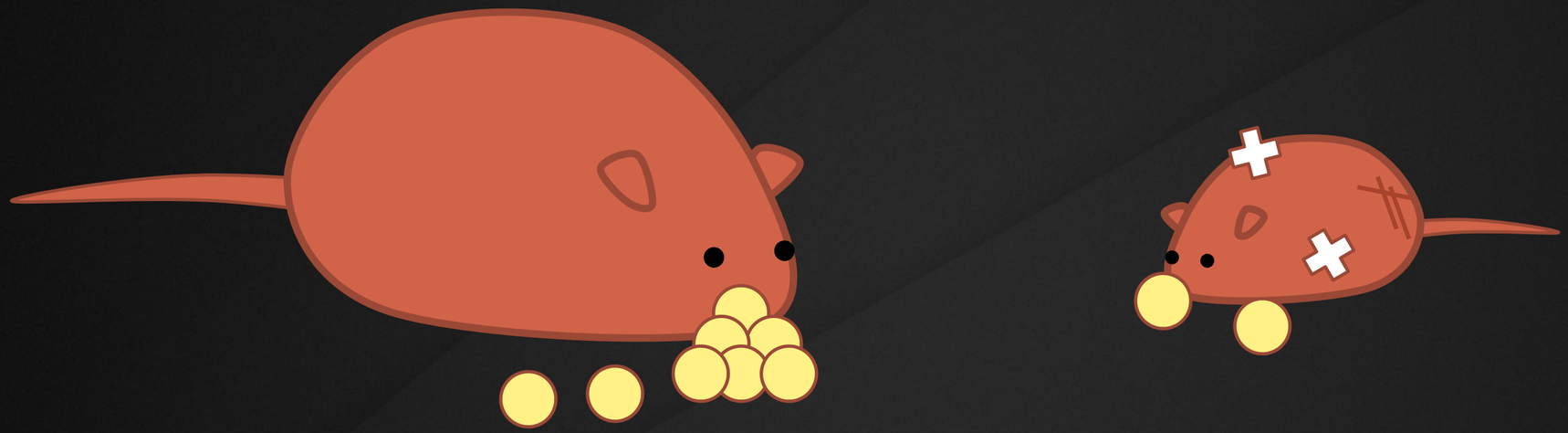
なぜ成長式のみでは不自然なのか?

POLYPHONY™ DIGITAL



なぜ成長式のみでは不自然なのか?

POLYPHONY™ DIGITAL



なぜ成長式のみでは不自然なのか?

POLYPHONY™ DIGITAL

産まれる時期が違う！

□□□□□□□□□ !

発芽シミュレーションは必要！

発芽シミュレーションは必要！

（やりたいだけ）

参考になるページの紹介

日本植物生理学会 みんなのひろば

https://jspp.org/hiroba/

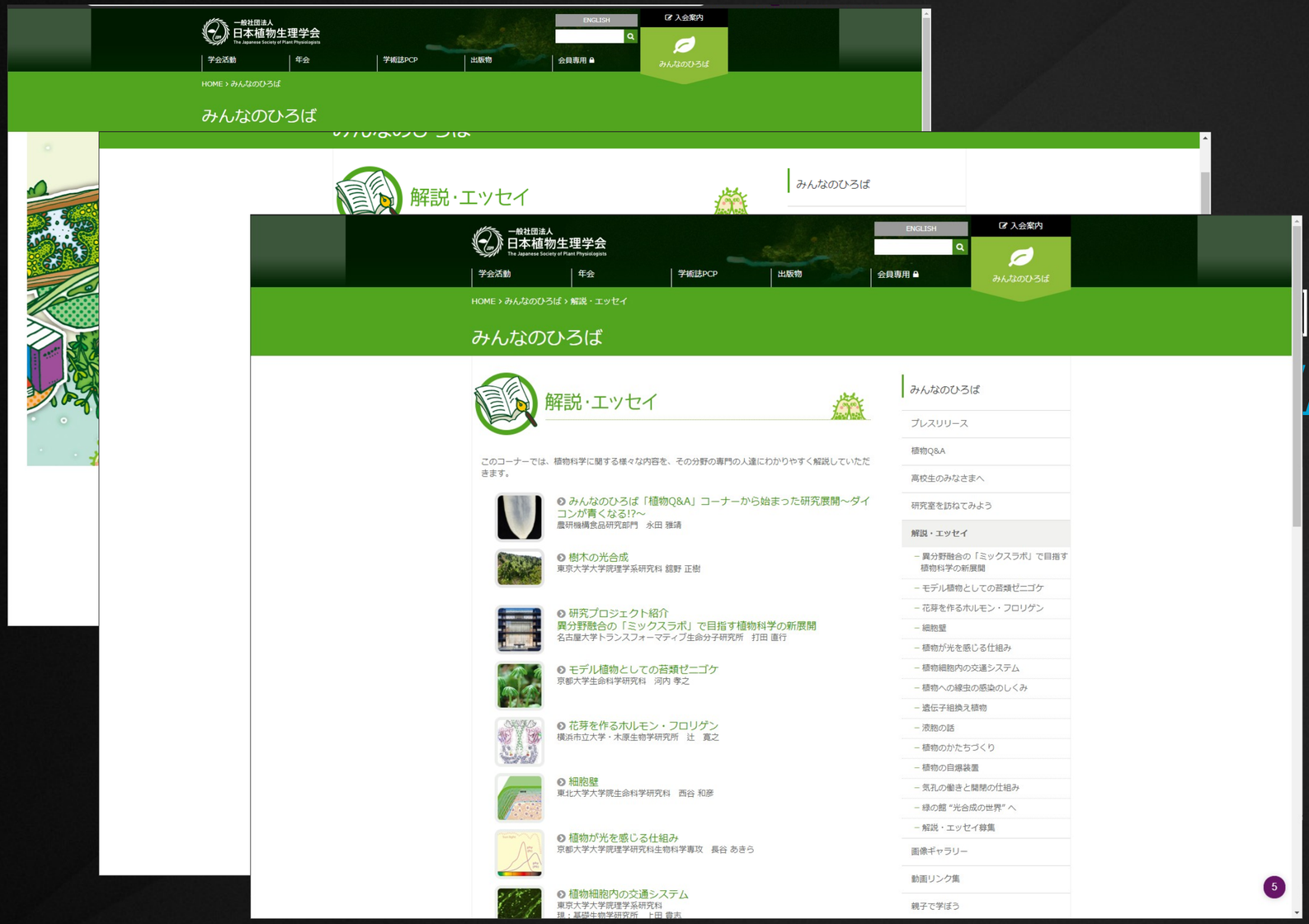
POLYPHONY™ DIGITAL

□□□□□□□□□□□□

□□□□□□□□□　□□□□□□□

ps://jspp.org/hiro

POLYPHONY™ DIGITAL



参考になるページの紹介

本植物生理学会 みんなのひろば

/jspp.org/hiro

POLYPHONY™ DIGITAL

専門家に聞いてみたら…

「発芽のシミュレーションは難しいですよ」

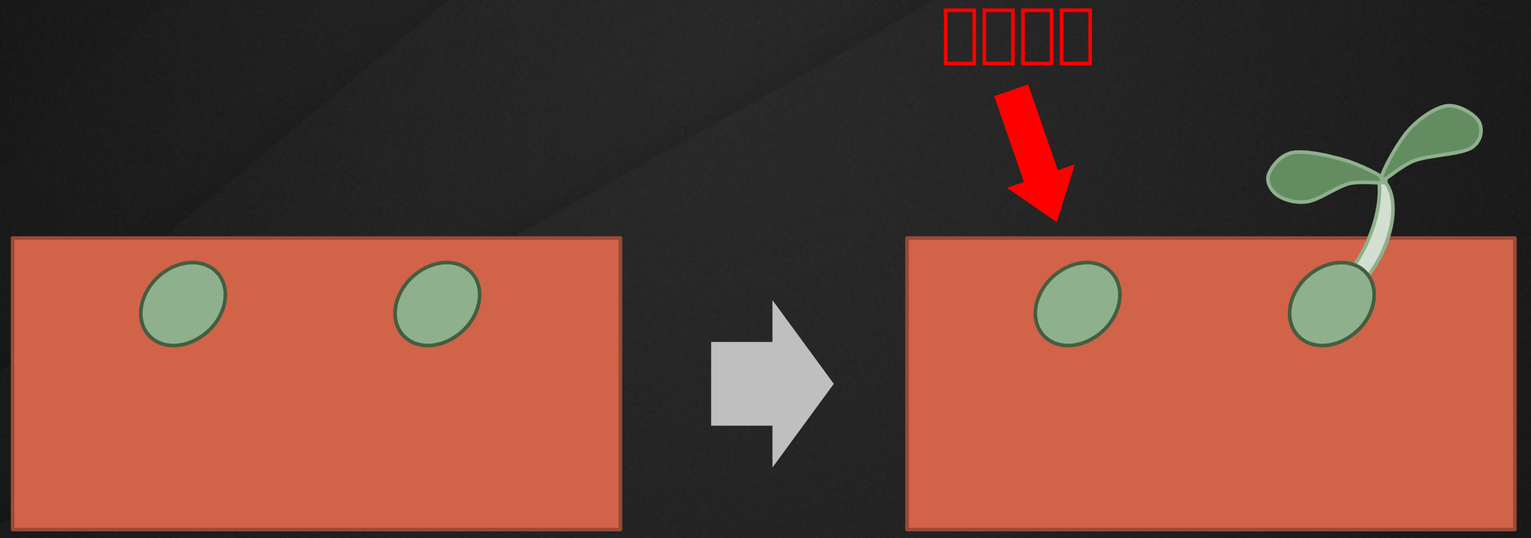
[illegible]

[illegible]

POLYPHONY™ DIGITAL

発芽、やりましょう
というか楽しそうだからやりたい

同時期に植えた種子でも発芽しない



[redacted]

POLYPHONY™ DIGITAL

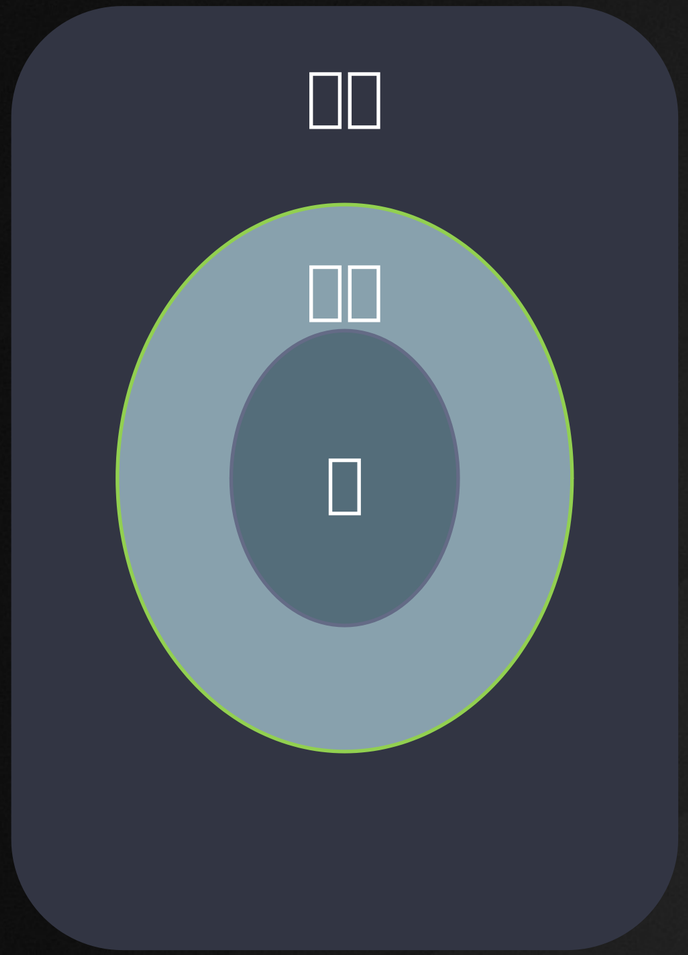
「発芽式」を探してみた

見つからない !!

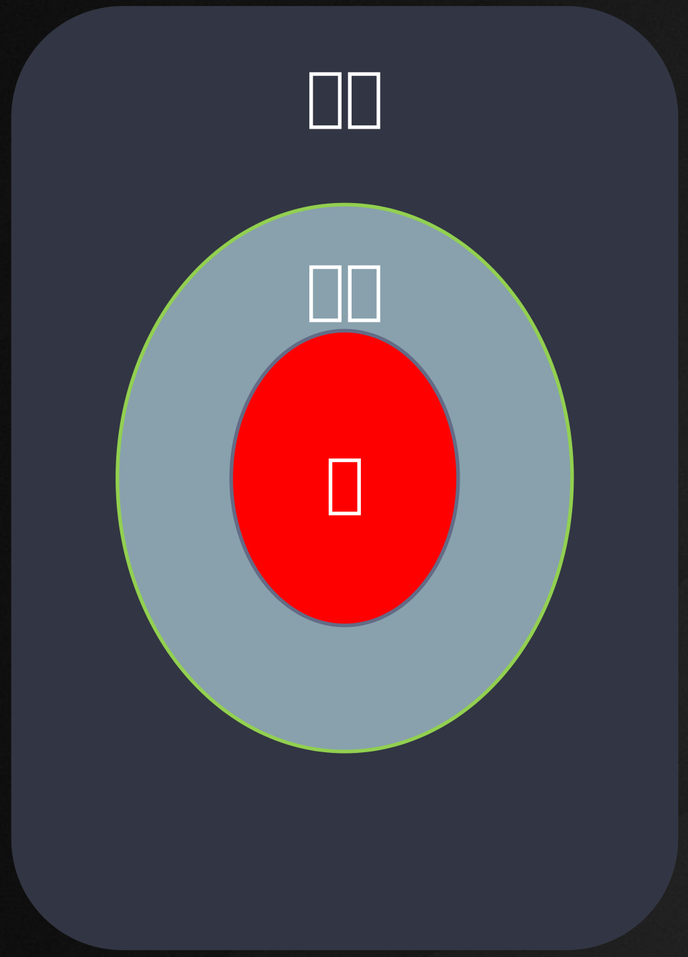
「発芽式」を探してみた

作るしかない !!!

□□□□□□□□



発芽しない要因/胚



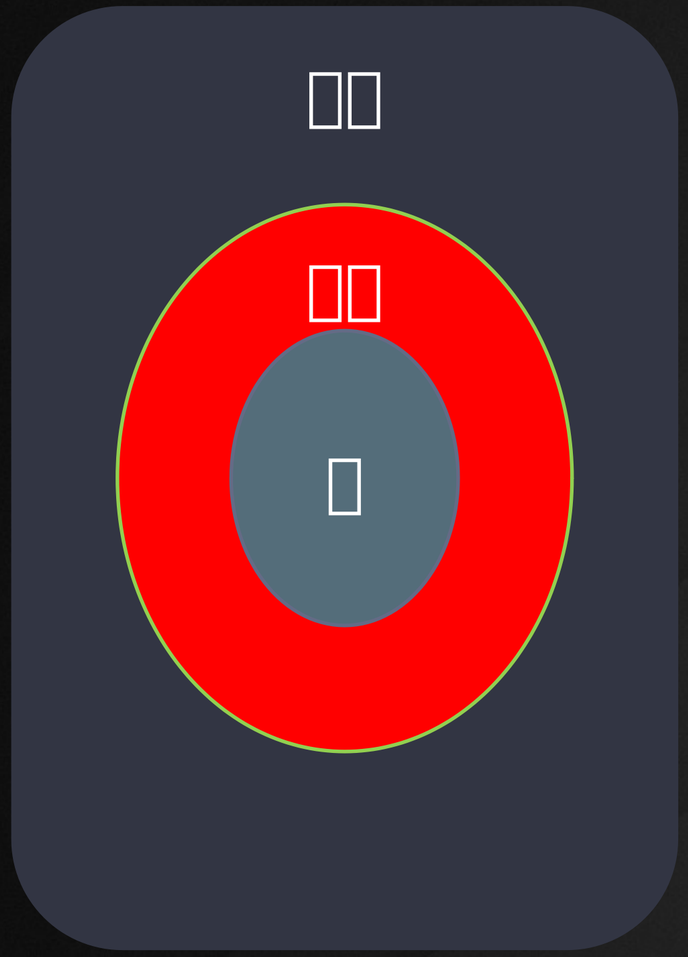
・胚が形態的に未熟
芽などの機能が備わっていない

・生理的未熟
発芽抑制物質（ABAなど）が、発芽促進物質（GA
など）により抑制、または除去される必要がある

一度低温を経験するなど
発芽の際に変化が必要

参考文献 [南川 1984] [Weitbrecht et al. 2011] [江刺 1977]

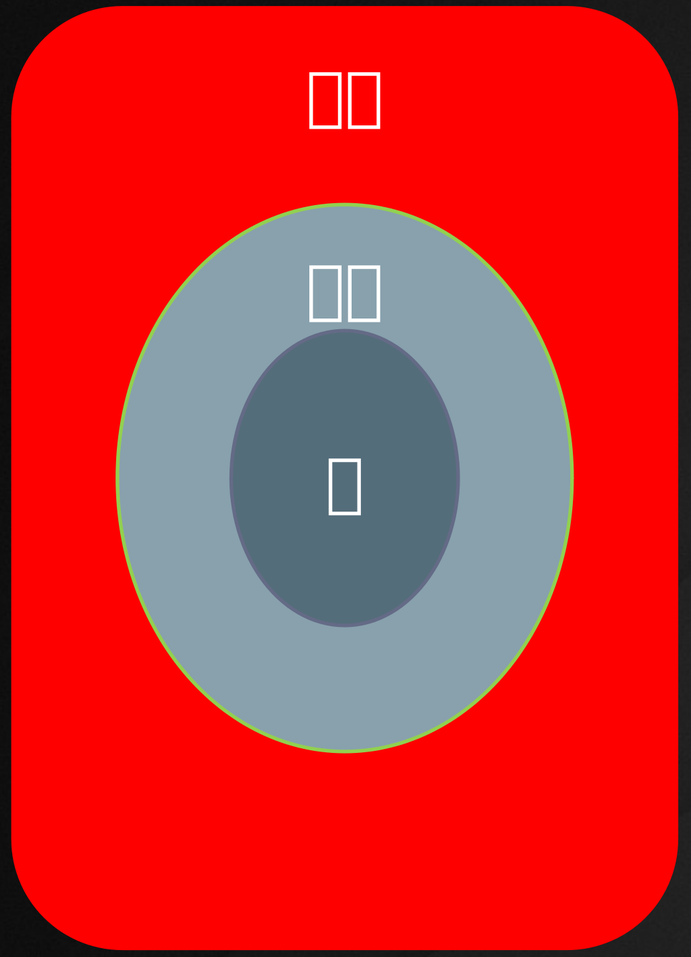
発芽しない要因/種皮



・水を通さない
種皮の耐久性が落ち、剥がれ落ちる必要がある

・水は通すが、硬くて芽が出てこれない
柔らかくなったら出てこれる
つまり水分がいっぱい必要

参考文献 [益守 1995]



発芽しない要因 / 環境

・単に環境的に成長できない

- 成長可能温度でない
- 水分がない

などなど

POLYPHONY™ DIGITAL

発芽しない要因

●胚
・胚が形態的に未熟
・生理的未熟
●種皮
・水を通さない
・水は通すが、硬くて芽が出てこれない
●環境
・単に環境的に成長できない

発芽しない要因

●胚

・胚が形態的に未熟 →形態的休眠

・生理的未熟→生理的休眠

●種皮 →物理的休眠

・水を通さない

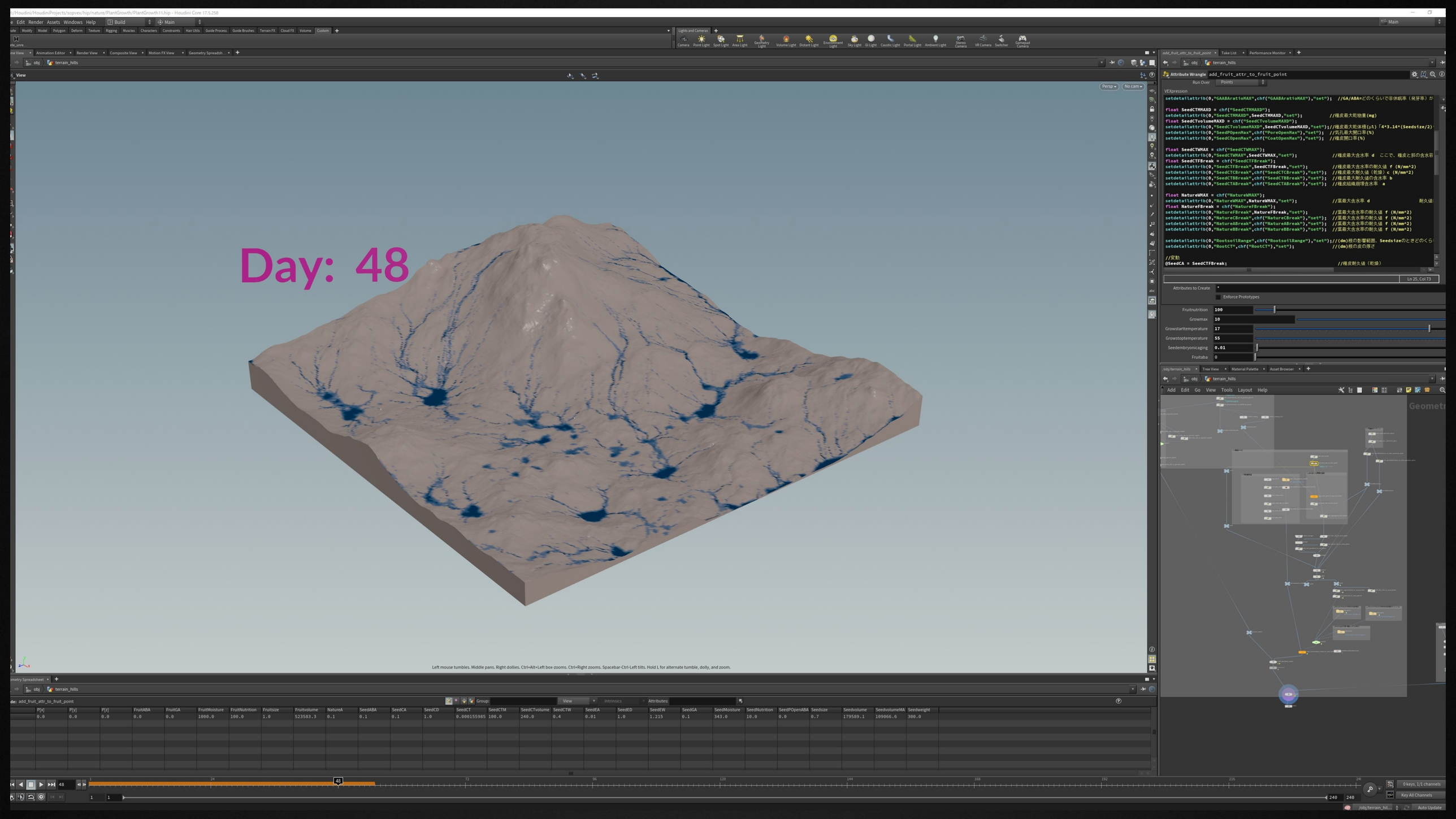
・水は通すが、硬くて芽が出てこれない

●環境 →環境休眠

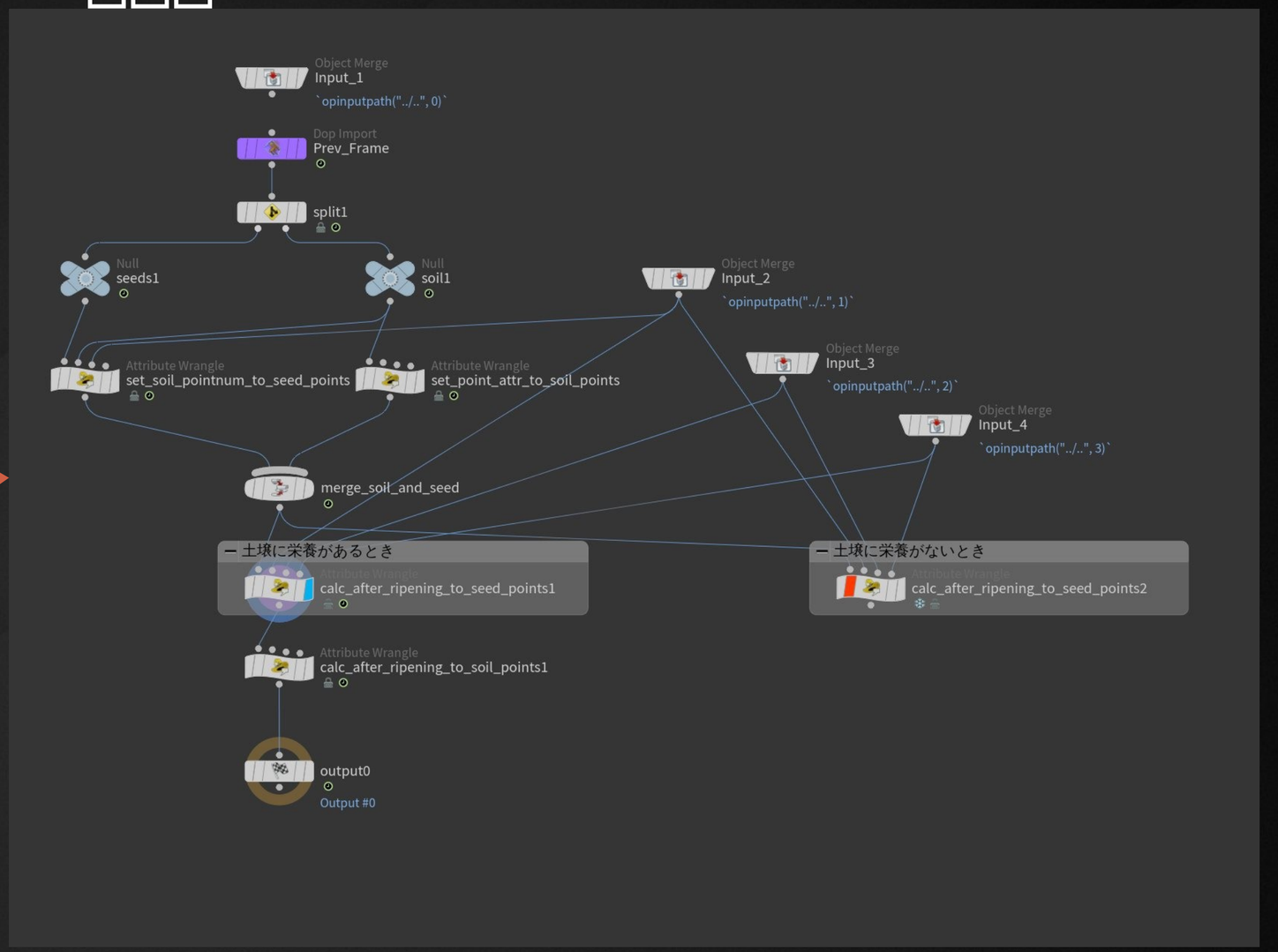
・単に環境的に成長できない
参考文献 [Baskin et al. 2009]

発芽する条件

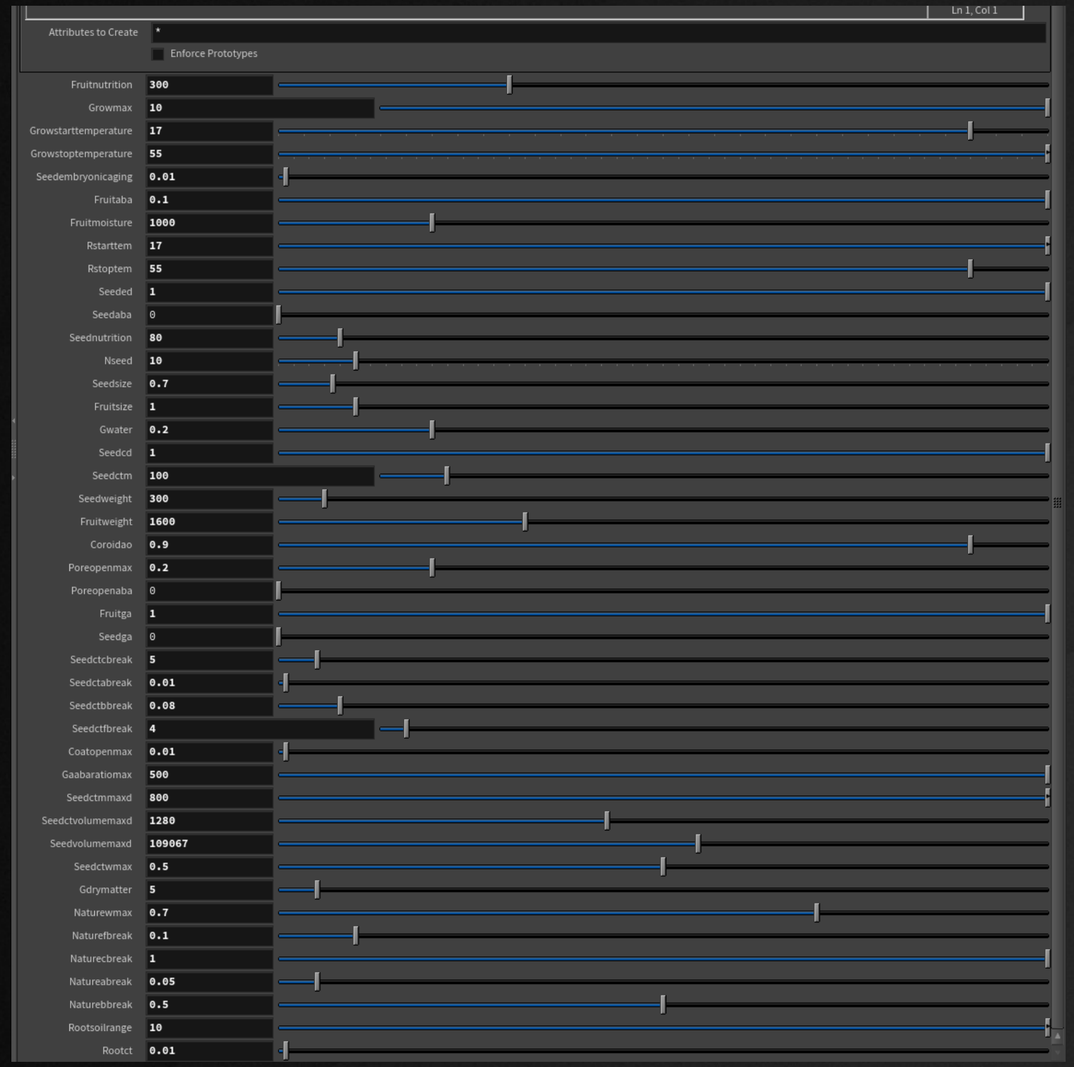
1. 環境は成長できる環境である
2. 種皮を水が通過する
3. 胚が形態的に未熟でない
4. 生理的未熟でない
5. 種皮が柔らかく、芽が出てこれる > 発芽！


Day: 48

□□□



POLYPHONY™ DIGITAL



植物種子のパラメータ

登熟 → 追熟 → 後熟

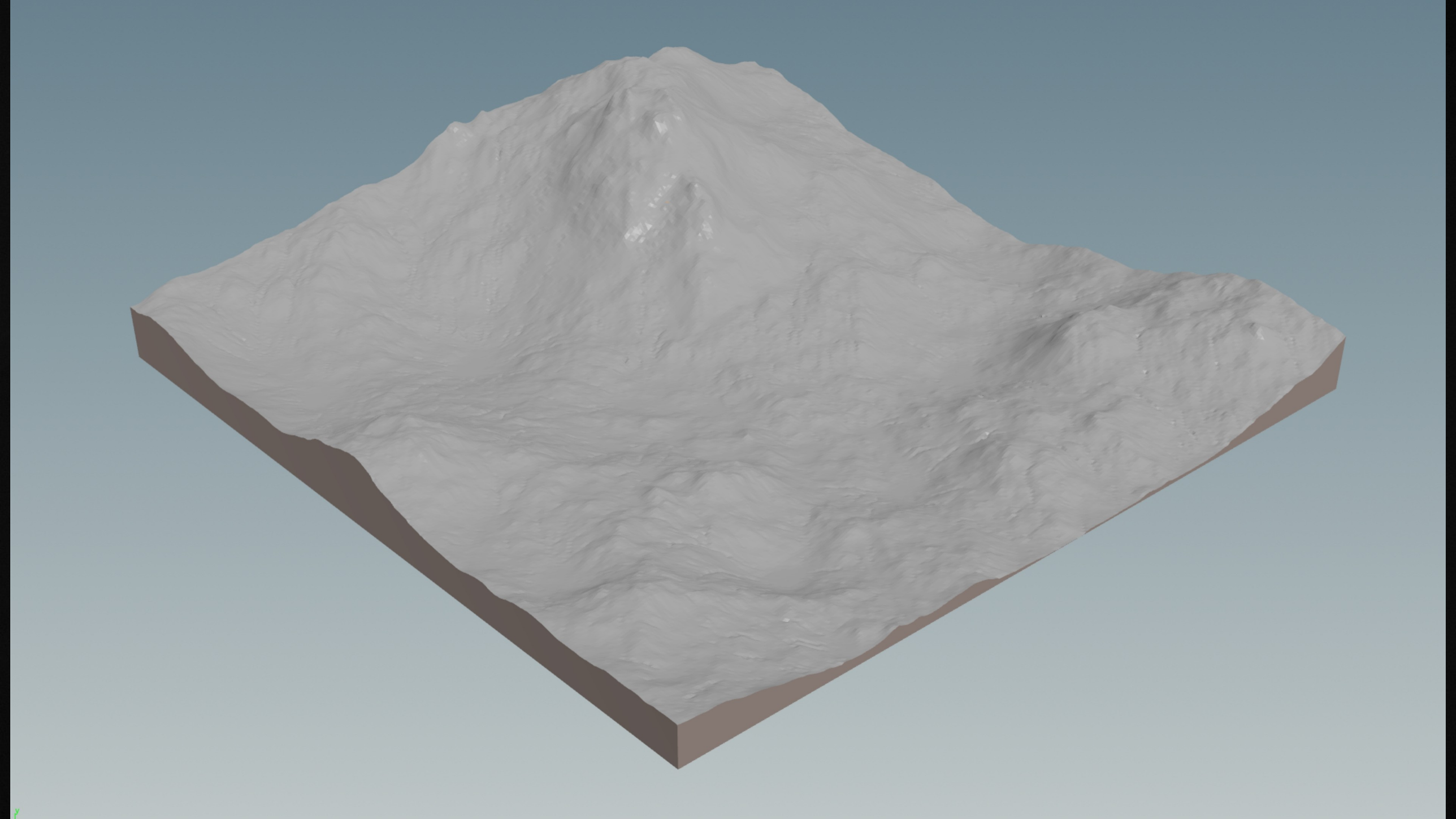
参考文献 [鈴木ら 1968]

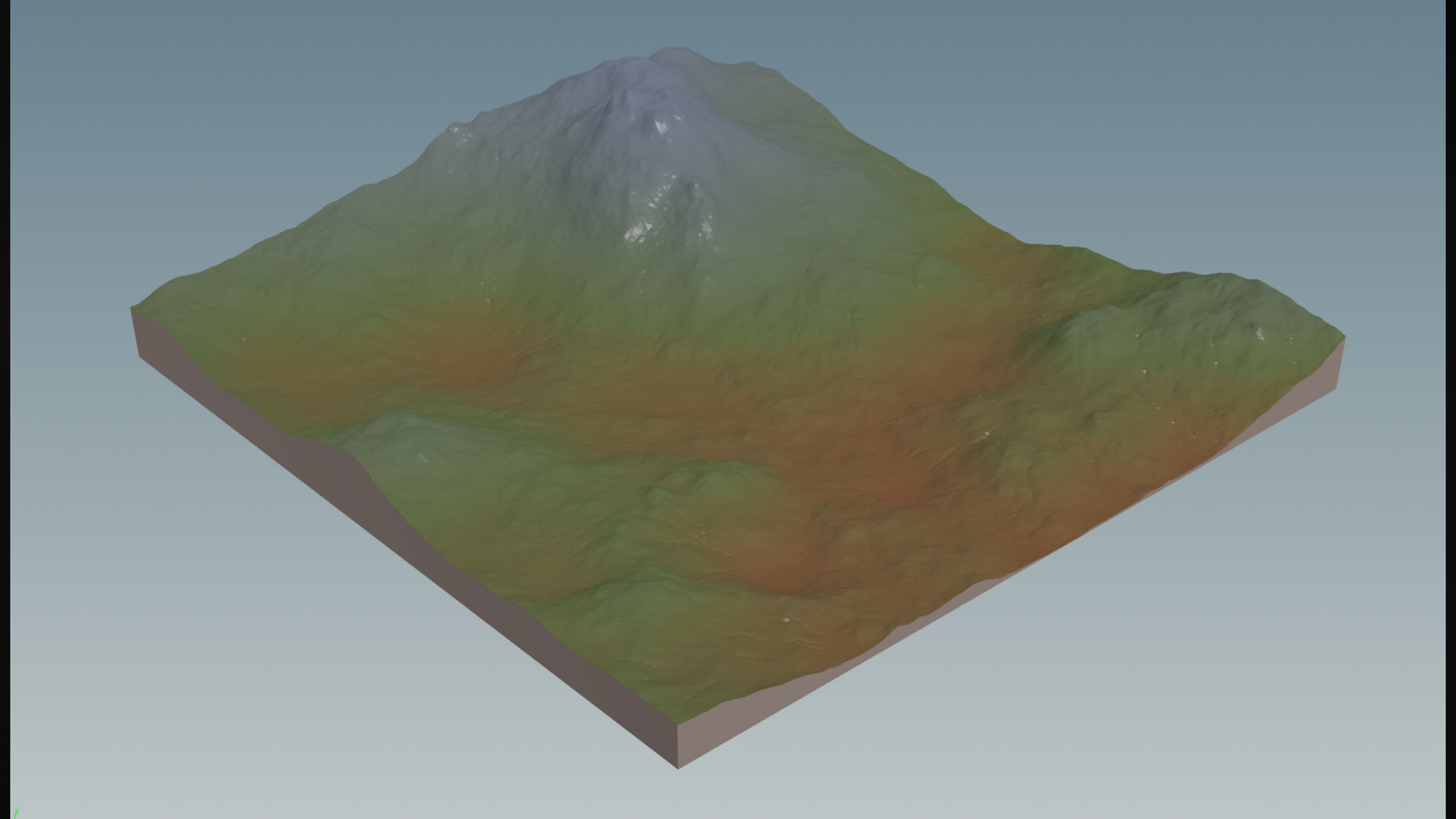
POLYPHONY DIGITAL

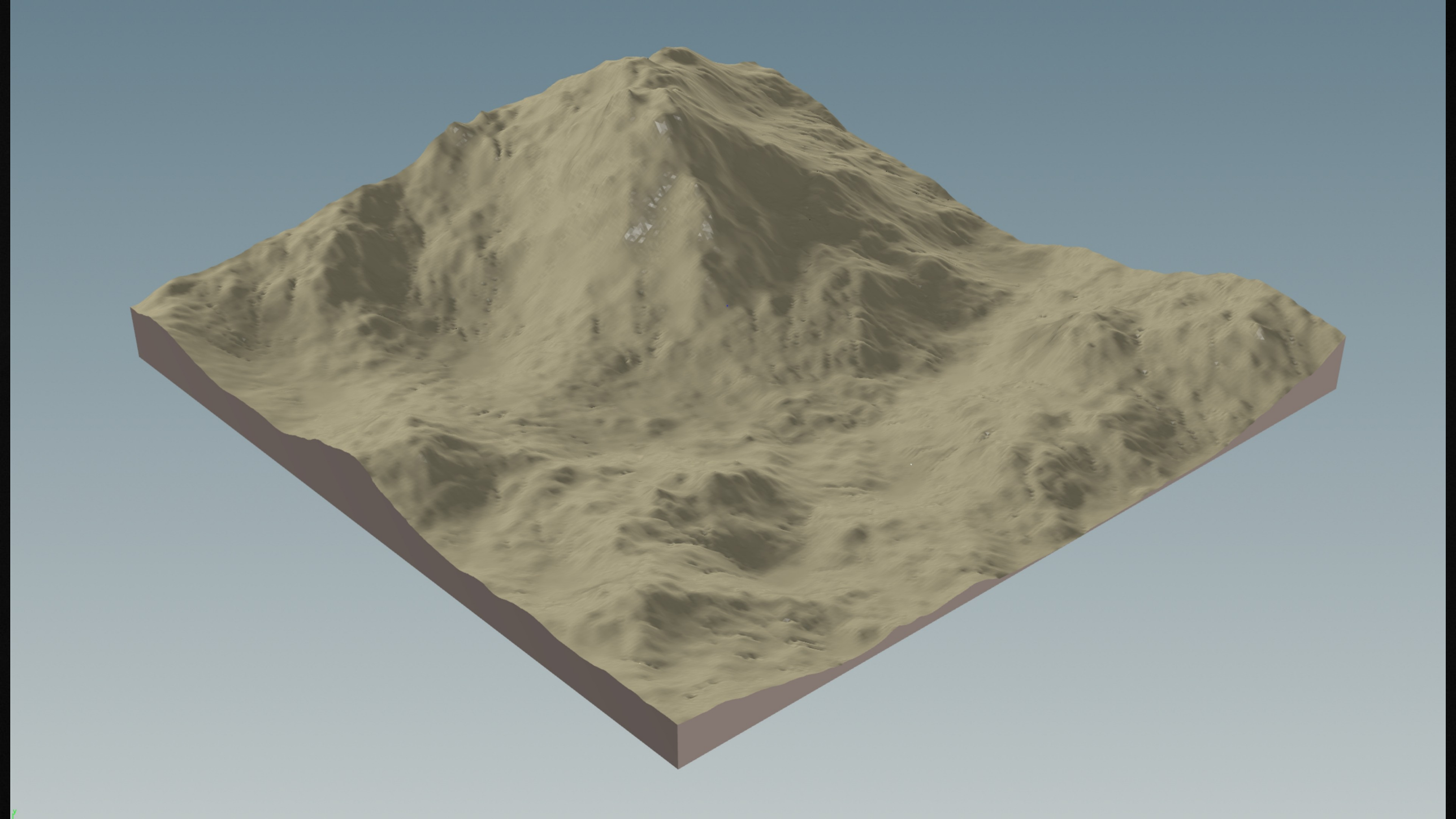
□□□□□□□□
VEX □□□

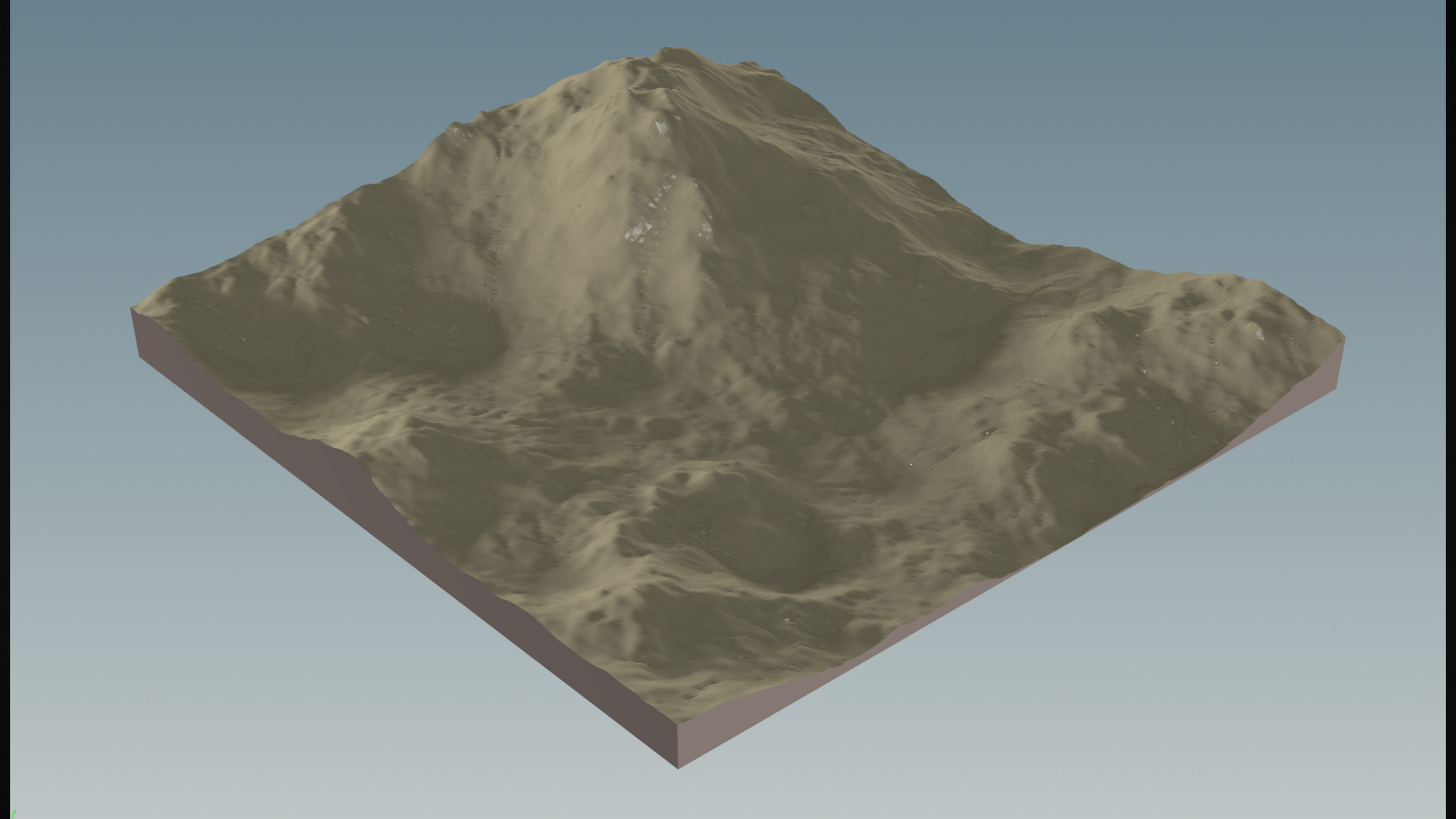
```
//水分透過度計算
Wu = 17.9 * pow(10, -6) * (412.85 / (0.555 * (theta + 273) * 1.8 + 120)) * pow(((theta + 273) * 1.8) / 527.67), 1.5);
WCab = (217 * 6.1078 * pow(10, (7.5 * theta) / (theta + 237.3)) * (SeedCTW - soilwater)) / (theta + 273);
Wro = (WPa * 28.966 * pow(10, -3)) / (8.314 * (theta * 273));
WD = (0.241 * pow((theta + 273) / 288, 1.75) * pow(10, -4) * 1013.25) / (WPa * 0.01 * theta);
WSh = 0.332 * pow((Wro * 0.001 * 0.00001) / Wu, 0.5) * pow(Wu / (Wro * WD), 1.0 / 3.0);
WVa = (WSh * WD * (WCab)) / WL;                         //(kg*m^2/s)
WVa = WVa * 1000 * 100;                                 //(g*dm^2/s)

if (SeedCTBreak == 1) {    //種皮が壊れていれば

    float beforemoisture = SeedMoisture;
    SeedMoisture = beforemoisture - (SeedEW * WVa * 4 * 3.14 * pow(Seedsize / 2, 2) * SeedPOpenABA); //種子全体の水分量(g)

    if (0 < SeedMoisture) {
        SeedEW = SeedMoisture / beforemoisture;                 //胚含水率
    } else {
        SeedEW = 0.0;
    }
}
if (SeedCTBreak == 0) {    //種皮が壊れていなければ

    float beforemoisture = SeedMoisture;
    SeedMoisture = beforemoisture - (SeedCTW * WVa * 4 * 3.14 * pow(Seedsize / 2, 2) * SeedCOpenMax); //種子全体の水分量(g)

    if (0 < SeedMoisture) {
        SeedCTW = SeedCTW * (SeedMoisture / beforemoisture);        //種皮含水率
        SeedEW = SeedEW * (SeedMoisture / beforemoisture);          //胚含水率
    } else {
        SeedCTW = SeedCTABreak;
        SeedEW = SeedCTABreak;
    }

    if (SeedCTW < SeedCTABreak) {
        SeedCTBreak = 1;
    }
}

//ABA\GA分解生成
if (0 < WVa) { //乾燥のとき
    if (moisture != 0) {
        moisture = 0;
    }
    dryer += 1;

    if (dryer == 1) {
        startSeedGA = SeedGA;
        startSeedABA = SeedABA;
    }

    SeedABA = startSeedABA + (MAXSeedABA - startSeedABA) * (pow(ABAb, pow(e, -1 * ABAc * (dryer - ABAa))));
    SeedGA = startSeedGA - 1 * startSeedGA * (pow(GAb, pow(e, -1 * GAc * (dryer - GAa))));

} else if (WVa < 0) { //吸水のとき
    if (dryer != 0) {
        dryer = 0;
    }
    moisture += 1;

    if (moisture == 1) {
        startSeedGA = SeedGA;
        startSeedABA = SeedABA;
    }

    SeedABA = startSeedABA - 1 * startSeedABA * (pow(ABAb, pow(e, -1 * ABAc * (moisture - ABAa))));
    SeedGA = startSeedGA + (MAXSeedGA - startSeedGA) * (pow(GAb, pow(e, -1 * GAc * (moisture - GAa))));
}

//ABA変化による胚気孔の開口歯積
SeedPOpenABA = SeedPOpenMax * (1 - pow(chf("b"), pow(e, -1 * chf("c") * (SeedABA / (SeedMoisture + SeedNutrition + SeedABA) - chf("a")))));//シダ種子だと約c=80。ノート参照。一個前のノードと同じ働にする
//::::::::::::ここで胚の開口歯積を変えてあるので、胚と種皮の水分比を変えてあげるようにする。（水分透過率計算を改造）


//条件を元に胚根の成長計算:::::::::::::あとで胚と根は分ける
if (SeedEW >= GWater) {
    nonsleep = SeedGA / (SeedABA * GAABAratioMAX);                                  //水が足りてるとき
    if (nonsleep > randsleep) {                                                     //GAが優勢のとき
        if (Rstoptem >= theta) {                                                    //成長停止温度以上のとき（成長開始温度以下は、計算式のなかにはいってる）

            //成長計算
            GrowtemV = GrowtemK * Growtema * (1 - pow(e, GrowtemK * (Growtema - 1)));  //成長温度速度計算
            if (GrowtemV <= 0) {
                GrowtemV = 0.0;
            }
            GrowillY = (GrowtemV * Growillk * log(Growilluminance * 86400)) / abs(theta);//光合成速度計算
            Growscale = point(0, "Growscale", p) * (pow(e, log(plantGrowmax - point(0, "Growscale", p)) * (1 - pow(e, -1 * GrowillY * (Growi + 1 - 1)))));//後熟開始種子の乾物量からの成長倍数

            //栄養量が足りなくなったら成長がとまる。
            SeedNutrition = SeedstartNutrition - (Seedweight * (Growscale - point(0, "Growscale", p)) / SyOmatter);
            if (SeedNutrition < 0) {
                Growscale = point(0, "Growscale", p) + (SeedstartNutrition * SyOmatter) / Seedweight;
                SeedNutrition = 0.0;
            }

            if (Growscale != point(0, "Growscale", p)) {   //成長していれば
                SeedGrowmax = (-1 * pow(e, -1 * (SeedCTW - 1 * (SeedCTABreak + log(SeedvolumeMAX - SeedvolumeMAXD)))) + SeedvolumeMAX) / Seedvolume;

                if (SeedCTBreak == 0) {    //種皮が壊れていなければ
                    //種皮破壊計算
                    if (SeedGrowmax < Growscale) {
                        Seedvolume = SeedGrowmax * Seedstartvolume;                 //種子の大きさ(μl)この含水量の時の最大容量
                        EGpressure = (Naturegrowpower * (Growscale - SeedGrowmax) * Seedstartvolume) + Eforce;//N  種皮を押す成長力+外部からの衝撃
                        if (SeedCA < EGpressure) {
                            SeedCTBreak = 1;
                            Life = 1;                                               //発芽！！！！
                            setpointattrib(0, "GerminationDay", p, flame, "set");       //何日に発芽したか
                        } else {
                            Seedvolume = SeedGrowmax * Seedstartvolume;             //種子の大きさはMAX。
                        }
                    } else {
                        Seedvolume = Growscale * Seedstartvolume;                   //種子の大きさは成長倍ぶん。
                    }
                } else if (SeedCTBreak == 1 && SeedGrowmax < Growscale) {   //種皮が壊れており、充分に胚が成長していれば
                    Life = 1;                                                       //発芽！！！！
                    setpointattrib(0, "GerminationDay", p, flame, "set");       //何日に発芽したか
                }

                Growi += 1.0;
                nonGrow = 0.0;
            } else {
                nonGrow += 1.0;
            }
        } else {
            nonGrow += 1.0;
        }
    } else {
        nonGrow += 1.0;
    }
}
```

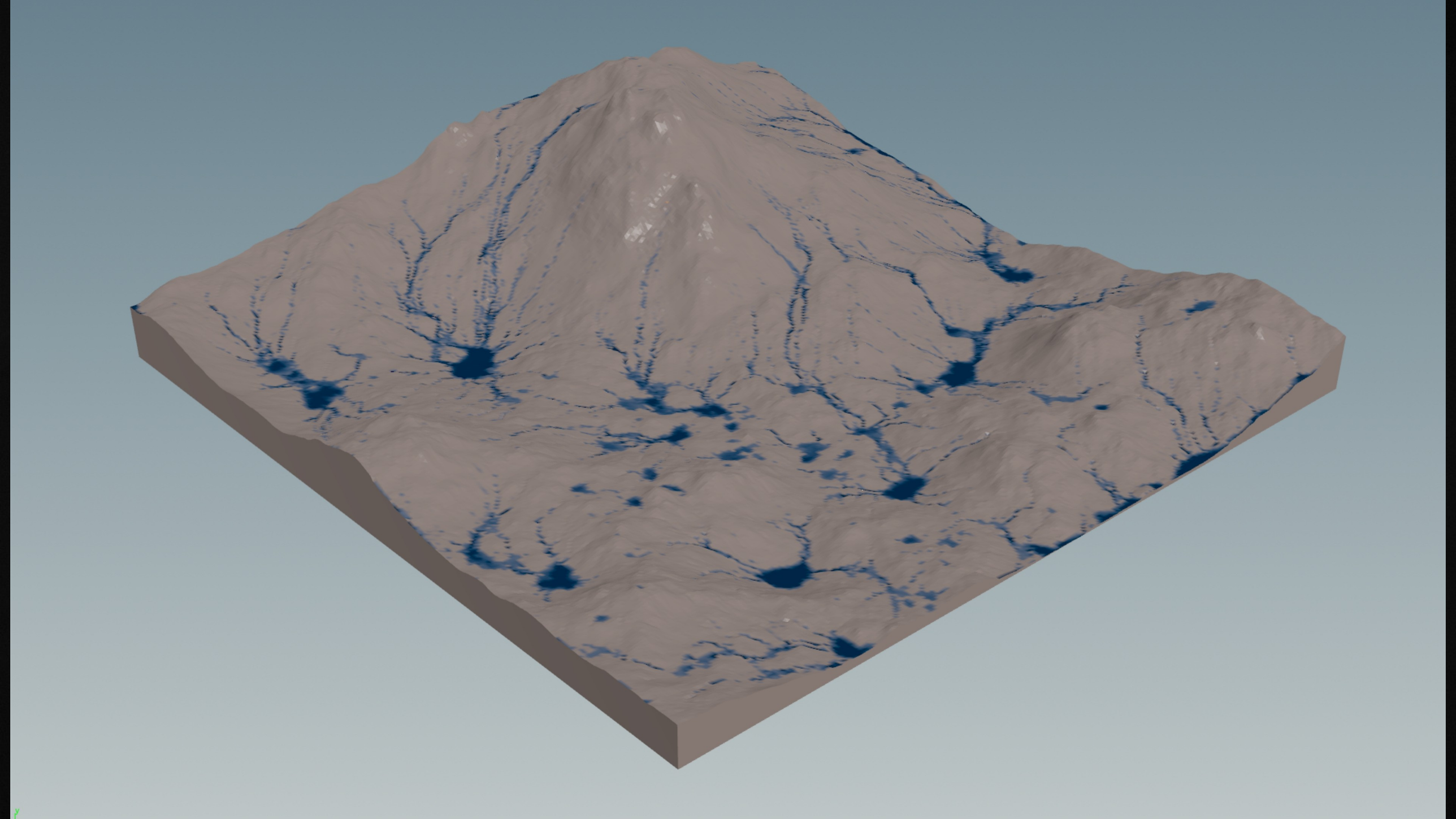
```
//後熟

nt SeedCTBreak = point(0, "SeedCTBreak", p);

//必要な値
//環境値

loat Humidity = point(0, "Humidity", p);                    //この場所での空気湿度
loat WindSpeed = 0.3;                                       //この場所での風速(m/s)
loat Growilluminance = detail(3, "Growilluminance");        //この場所での成長期間(W/m^2)
loat Harvilluminance = detail(2, "Harvilluminance");        //この場所での収穫期間(W/m^2)

//植物体
loat growmax = detail(1, "growmax") / point(0, "Seedsize", p);          //最大成長倍　種子の時の何倍になるか
loat Naturegrowpower = detail(1, "Naturegrowpower");        //(N/μl)植物の成長力
loat SyOmatter = detail(1, "SyOmatter");                    //栄養量含む乾物量(g)  1gの栄養量から合成される乾物量

//種子体
loat coroidAO = detail(1, "coroidAO");                      //１ｍｌ１ｇの密度でどれだけ光を通すか。
loat Seedweight = point(0, "Seedweight", p) * 0.001;        //種子全乾伸重(g)
loat Seedsize = point(0, "Seedsize", p);                    //種子の長さ(dm)
loat Seedvolume = point(0, "Seedvolume", p);                //種子の大きさ(μl)
loat SeedABA = point(0, "SeedABA", p) * 0.001;              //種子内に存在するABA(g)
loat SeedMoisture = point(0, "SeedMoisture", p) * 0.001;    //種子内に存在する水分量(g)
loat SeedNutrition = point(0, "SeedNutrition", p) * 0.001;  //種子内に存在する栄養量(g)
loat SeedGA = point(0, "SeedGA", p) * 0.001;                //種子内に存在するGA(g)
loat SeedCD = point(0, "SeedCD", p);                        //種子耐久値（老化）
loat SeedED = point(0, "SeedED", p);                        //胚耐久値（老化）
loat SeedCI = point(0, "SeedCI", p);                        //種皮の厚さ(dm)（含水）
loat SeedCvolume = point(0, "SeedCIvolume", p);             //種皮体積(μl)（含水）
loat SeedCTM = point(0, "SeedCTM", p) * 0.001;              //種皮乾物量(g)
loat SeedCA = point(0, "SeedCA", p);                        //種皮耐久値（乾燥）N
loat SeedEA = point(0, "SeedEA", p);                        //胚耐久値（乾燥）
loat SeedCTW = point(0, "SeedCTW", p);                      //種皮含水率
loat SeedEW = point(0, "SeedEW", p);                        //胚含水率

loat GWutrition = detail(1, "GNutrition");                  //発芽必要最低栄養量
loat GWater = detail(1, "GWater");                          //胚成長必要含水率0-1
loat Rstarttem = detail(1, "Rstarttem");                    //後熟開始温度
loat Rstoptem = detail(1, "Rstoptem");                      //後熟停止温度
loat GAABAratioMAX = detail(1, "GAABAratioMAX");            //GA/ABAｰどのくらいで非休眠率（発芽率）が100%になるか。
loat GDrymatter = detail(1, "GDrymatter");                  //胚発芽必要成長乾物量(mg)  発芽した直後も生きれる必要な乾物量（ちゃんと葉が起きⅠれるなど）

loat SeedCTWMAX = detail(1, "SeedCTWMAX");                  //種皮最大含水率 d
loat SeedWMAX = detail(1, "SeedWMAX");                      //胚最大含水率
loat SeedCTABreak = detail(1, "SeedCTABreak");              //種皮恒温環境含水率　a
loat SeedCTBBreak = detail(1, "SeedCTBBreak");              //種皮最大耐久値の含水率 b
loat SeedCTCBreak = detail(1, "SeedCTCBreak");              //種皮最大耐久値（乾燥）c (N/mm^2)
loat SeedCTFBreak = detail(1, "SeedCTFBreak");              //種皮最大含水率の耐久値 f (N/mm^2)
loat SeedCOpenMax = detail(1, "SeedCOpenMax");              //種皮開口率(%)(気孔を含む、気孔以外の構造Ⅰの開度)

loat ABAsyratioMAX = detail(1, "ABAsyratioMAX");            //ABAの栄養量からのMAXを合成比
loat GAsyratioMAX = detail(1, "GAsyratioMAX");              //GAの栄養量からのMAXを合成比

loat SeedPOpenMax = detail(1, "SeedPOpenMax");              //気孔最大開口率(%)
loat SeedPOpenABA = point(0, "SeedPOpenABA", p);            //気孔開口率(%)

loat SeedvolumeMAXD = point(0, "SeedvolumeMAXD", p);        //種子全乾体積(μl)
loat SeedvolumeMAX = detail(1, "SeedvolumeMAX");            //種子内含水時最大容量(μl)

//成長植物体
loat NatureA = point(0, "NatureA", p);                      //葉耐久値（乾燥）N

loat NatureW = point(0, "NatureW", p);                      //植物含水率
loat NatureMoisture = point(0, "NatureMoisture", p) * 0.001;    //植物内に存在する水分量(g)
loat NatureNutrition = point(0, "NatureNutrition", p) * 0.001;  //植物内に存在する栄養量(g)
loat Natureweight = point(0, "Natureweight", p) * 0.001;        //植物全乾体重(g)

loat NatureWMAX = detail(1, "NatureWMAX");                  //葉最大含水率 d                    耐久値は、１ｇの葉に対するものとする
loat NatureABreak = detail(1, "NatureABreak");              //葉恒温環境含水率　a
loat NatureBBreak = detail(1, "NatureBBreak");              //葉最大耐久値の含水率 b
loat NatureCBreak = detail(1, "NatureCBreak");              //葉最大耐久値（乾燥）c (N/mm^2)
loat NatureFBreak = detail(1, "NatureFBreak");              //葉最大含水率の耐久値 f (N/mm^2)
loat NatureOpenMax = SeedOpenMax;                           //葉開口率(%)(気孔開度葉全体の何比か)

loat RootsoilRange = detail(1, "RootsoilRange") * (point(0, "Growscale", p) / growmax);            //根の広がる距離(dm)
loat RootCI = detail(1, "RootCI");                          //根の皮の厚さ(dm)

//拡散計算に必要な値

loat R = 8.3144598 * 100000;                                //ガス定数(dm^2 g s^-2 k^-1 mol^-1)
loat e = 2.71828;                                           //ネイピア数
loat MW = 18.01528;                                         //1モル当たりの質量（水）(g)
loat PRPK = 148.0;                                          //1モル当たりの質量（栄養）土壌の最適比である(N/P/K):(10/8/7)で計算(g)
loat PRPK = 12.24 * pow(10, -9);                            //NPKの半径(dm)

//ABA\GA分解生成に必要な値
loat ABAa = chf("ABAa"); //水分変化が最も激しい経過時間
loat ABAb = chf("ABAb") * 0.001; //aのときの初期値からの変化量(g)
loat ABAc = chf("ABAc"); //傾き具合
loat GAa = chf("GAa");   //水分変化が最も激しい経過時間
loat GAb = chf("GAb") * 0.001;   //aのときの初期値からの変化量(g)
loat GAc = chf("GAc");   //傾き具合

//乾燥\吸水判定に必要な変数
nt dryer = point(0, "dryer", p);
nt moisture = point(0, "moisture", p);
loat SeedABA = SeedABA;
loat SeedGA = SeedGA;
loat MAXSeedABA = point(0, "MAXSeedABA", p) * 0.001;
loat MAXSeedGA = point(0, "MAXSeedGA", p) * 0.001;
f (flame == 1) {
    MAXSeedABA = (SeedABA + ABAsyratioMAX * SeedNutrition); //(g)
    MAXSeedGA = (SeedGA + GAsyratioMAX * SeedNutrition); //(g)
}
loat startSeedGA = point(0, "startSeedGA", p);
loat startSeedABA = point(0, "startSeedABA", p);

//成長計算に必要な値
loat plantGrowmax = growmax;                    //この植物の最大成長倍率
loat GrowtemK = chf("GrowtemK");                //成長温度速度　比例定数k
loat Growtema = chf("Growtema");                //成長温度速度　呼吸量を決める定数
loat GrowtemV = 0.0;
loat Growtema = (Rstoptem - theta) / (Rstoptem - Rstarttem);
loat Growillk = chf("Growillk");                //成長光合成速度　比例定数k
loat GrowillY = 0.0;
loat Seedarea = 3.1415 * pow(Seedsize / 2, 2) * 0.01;    //m^2
rowilluminance = Growilluminance * Seedarea * point("op:../../../../environments1", "sunLight", p); //種子に当たる成長期間(W/m^2)
loat Growscale = point(0, "Growscale", p);
loat SeedGrowmax = 100.0;                       //発芽時前までの最大容量（初期種子からなん倍か）
loat Seedstartvolume = Seedvolume;              //種子の後熟前の大きさ
loat SeedstartNutrition = SeedNutrition;        //種子の後熟前の栄養量
loat Grow = 1.0;
loat nonsleep = 0.0;                            //休眠判定

//種皮破壊計算に必要な値
loat EGpressure = 0.0;                          //胚の成長による膨圧。
loat Eforce = chf("Eforce");                    //外部からの衝撃N

//水環境条件における生存率の減少量計算。これを数字で適用させる。
```

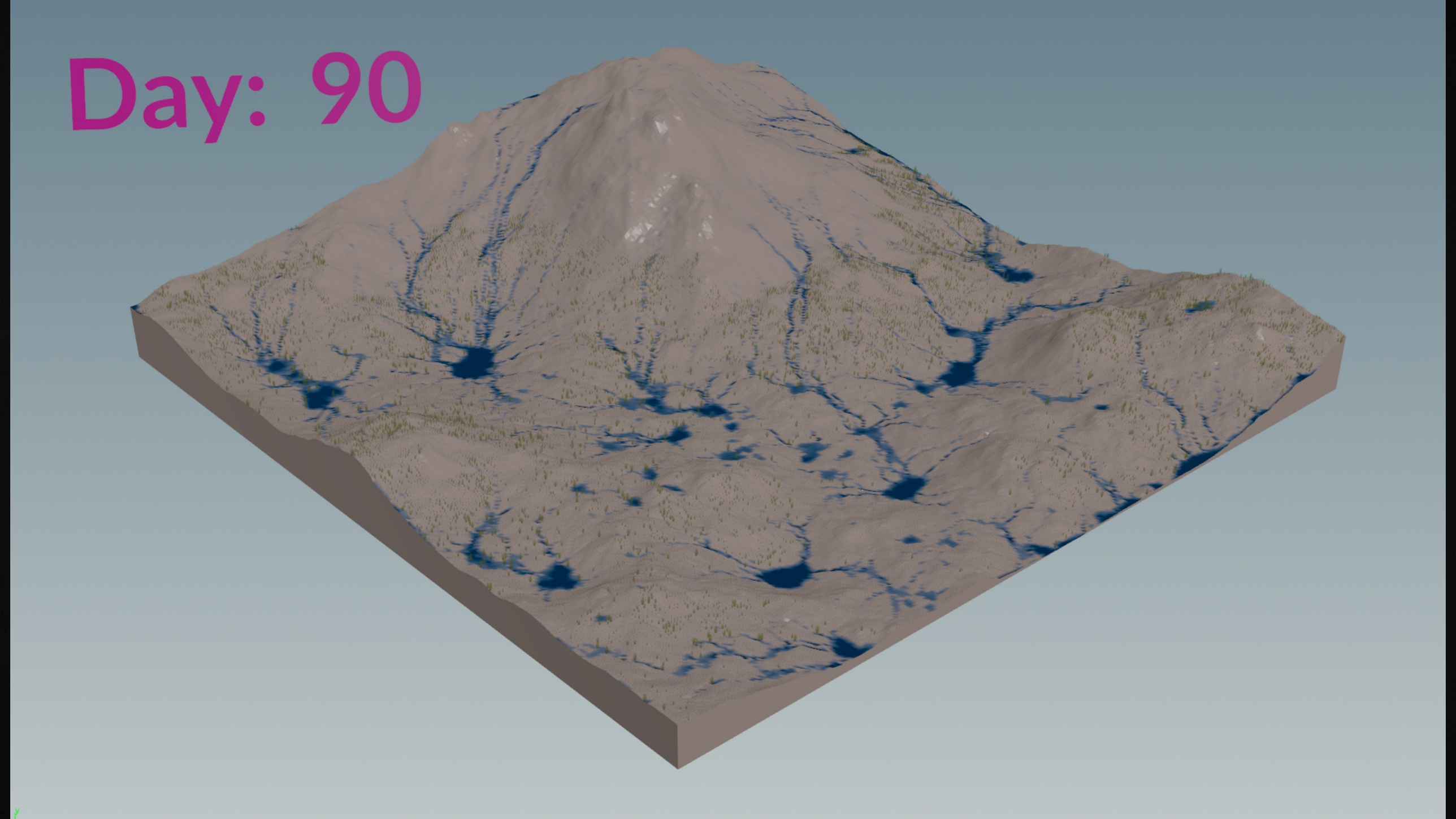


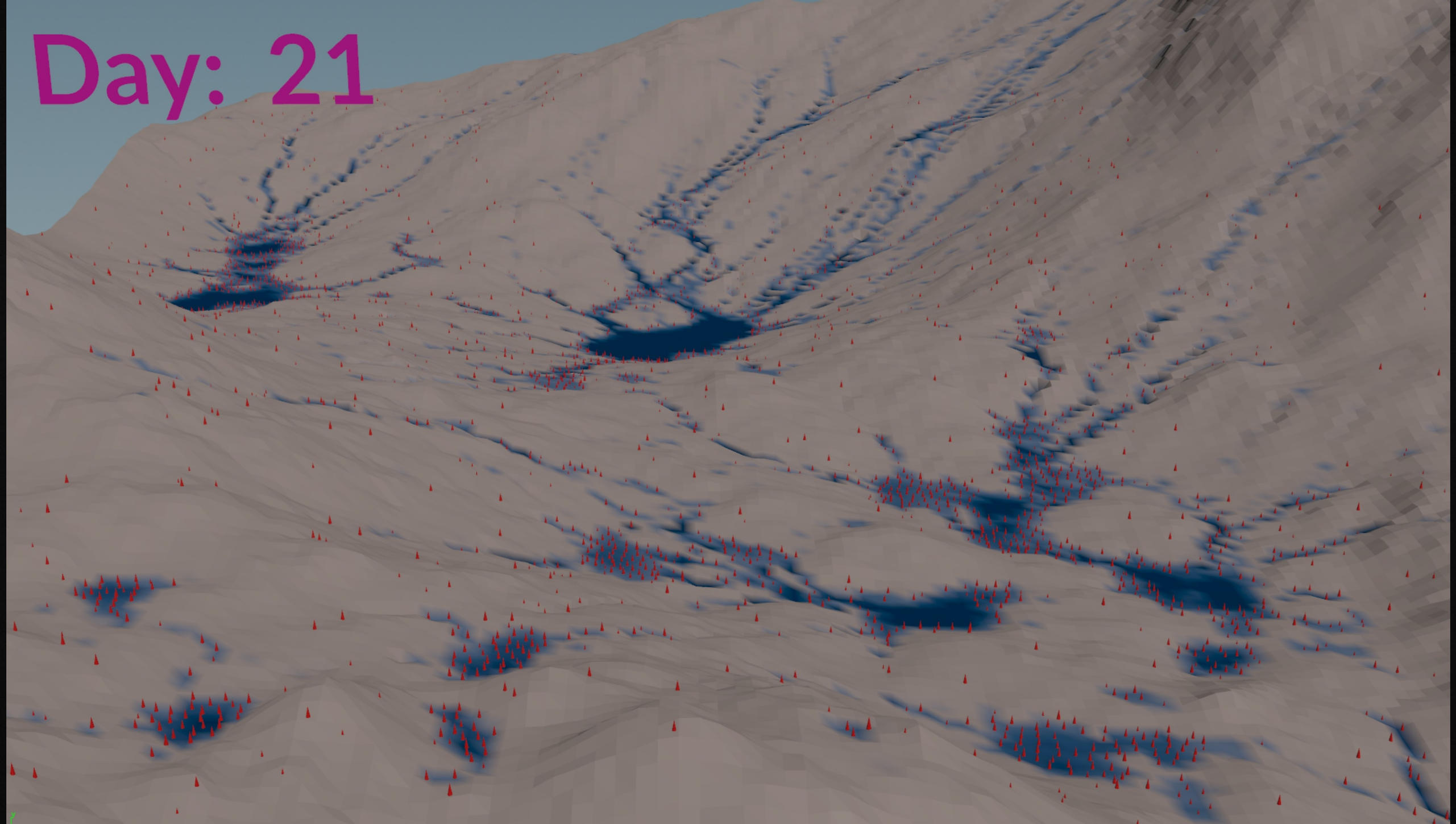


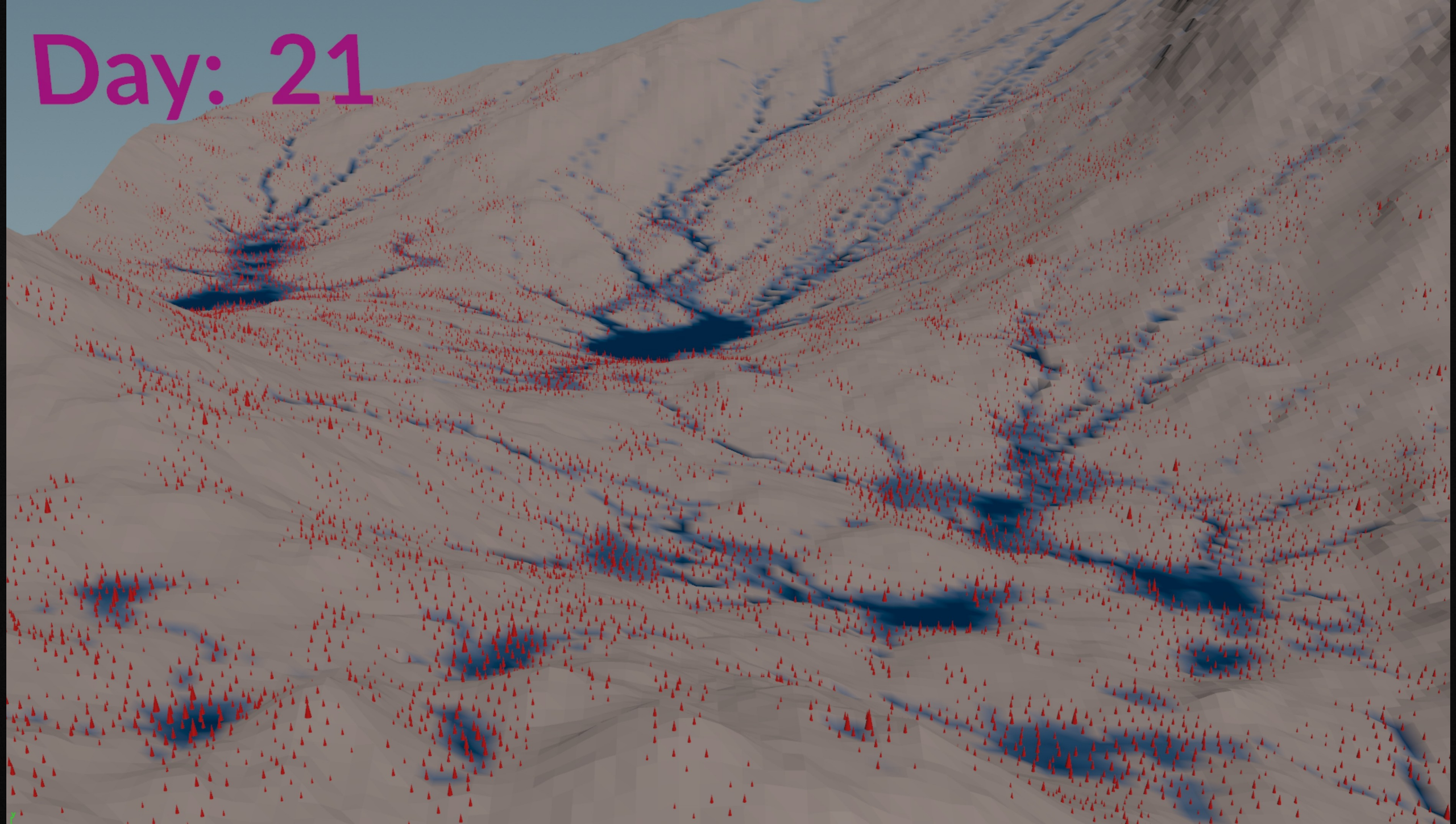


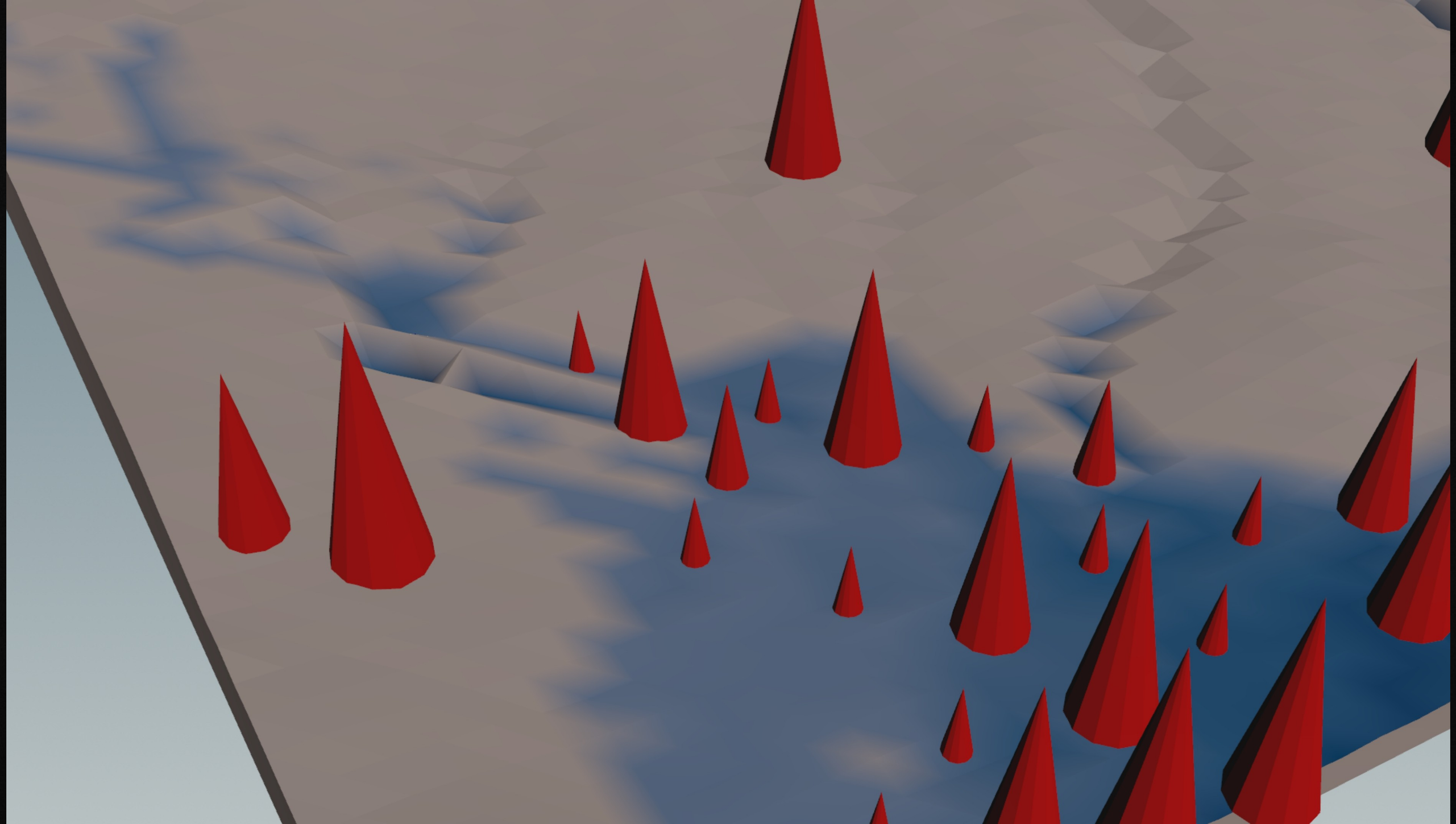


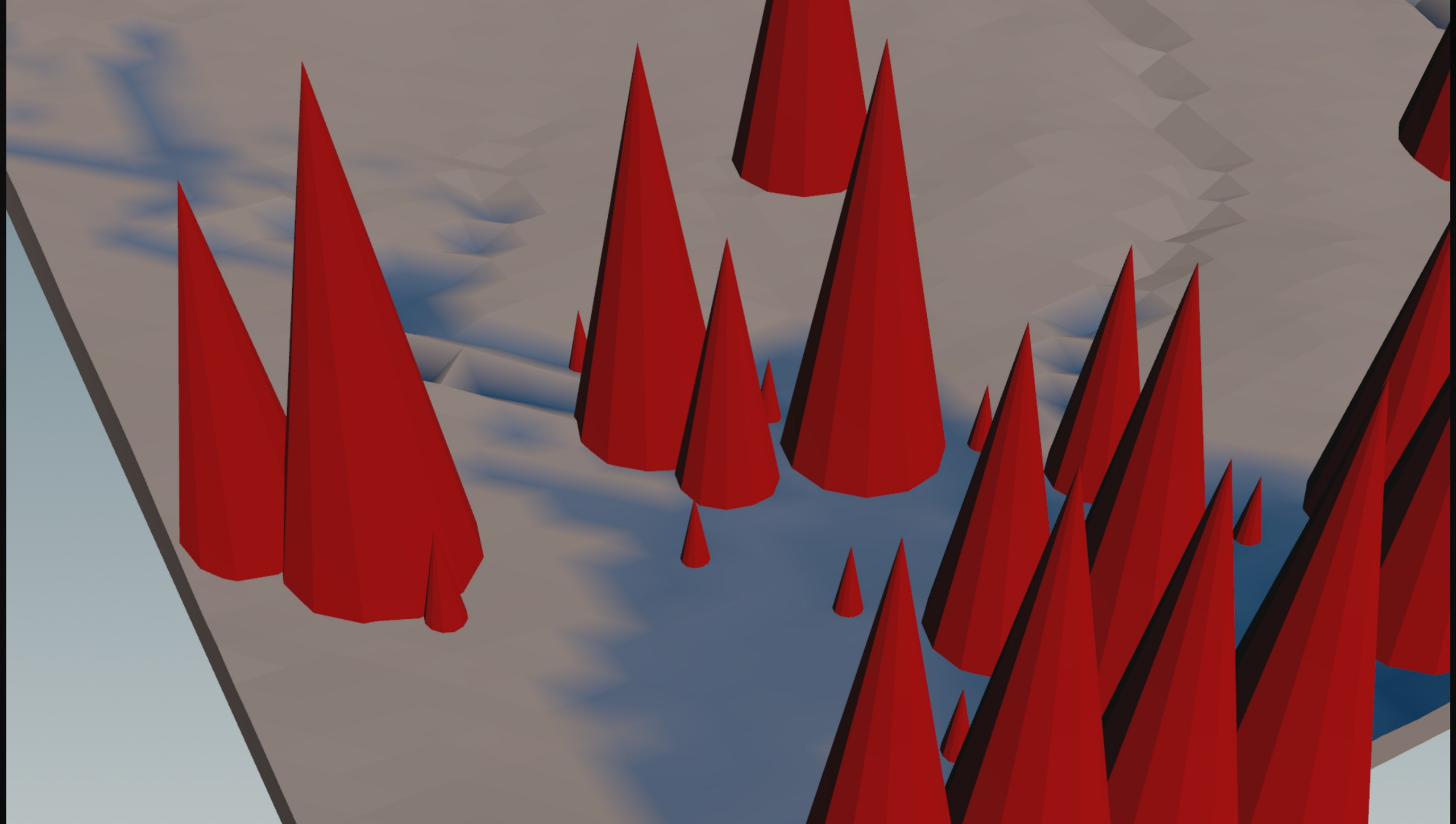


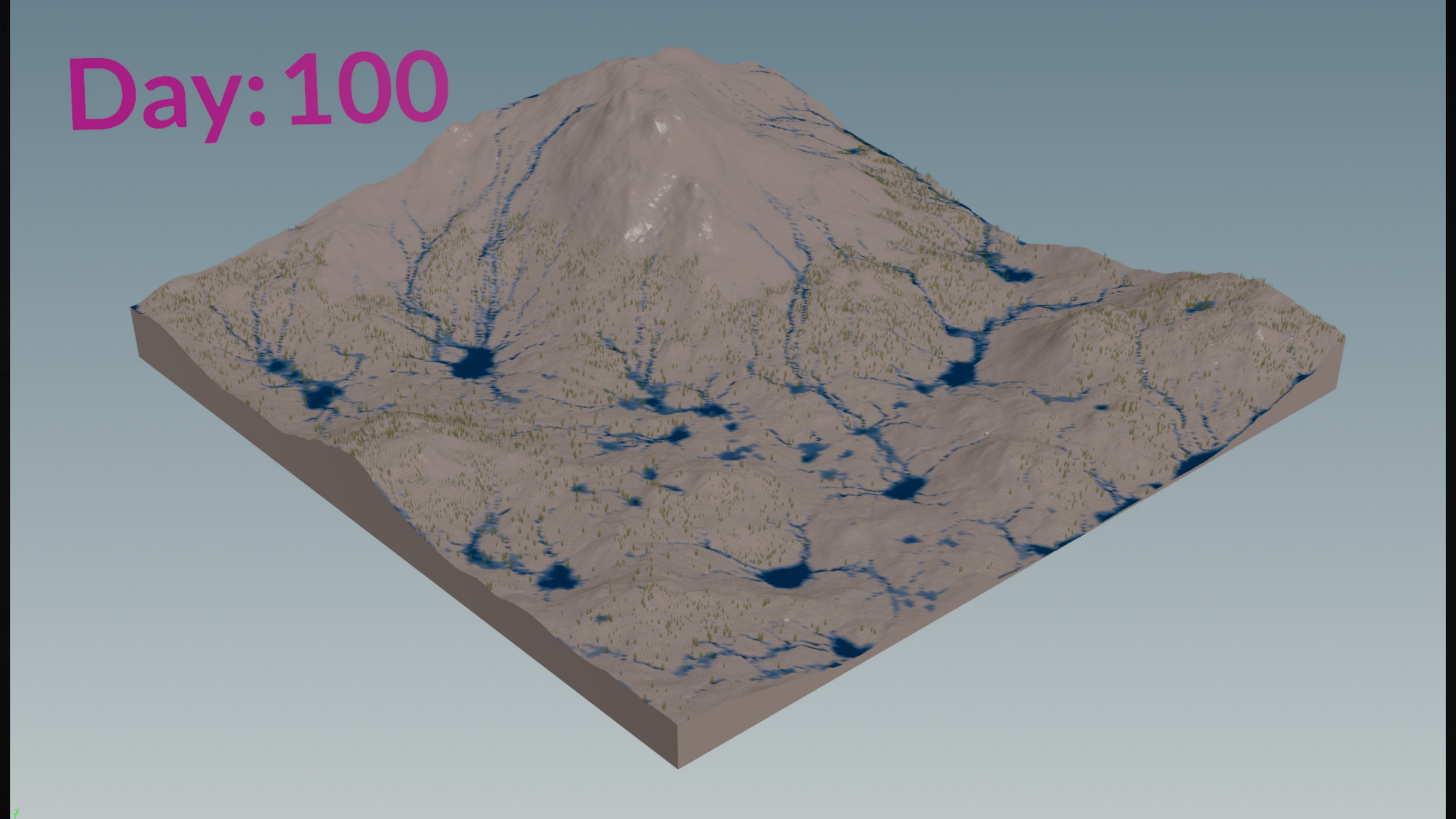

Day: 90

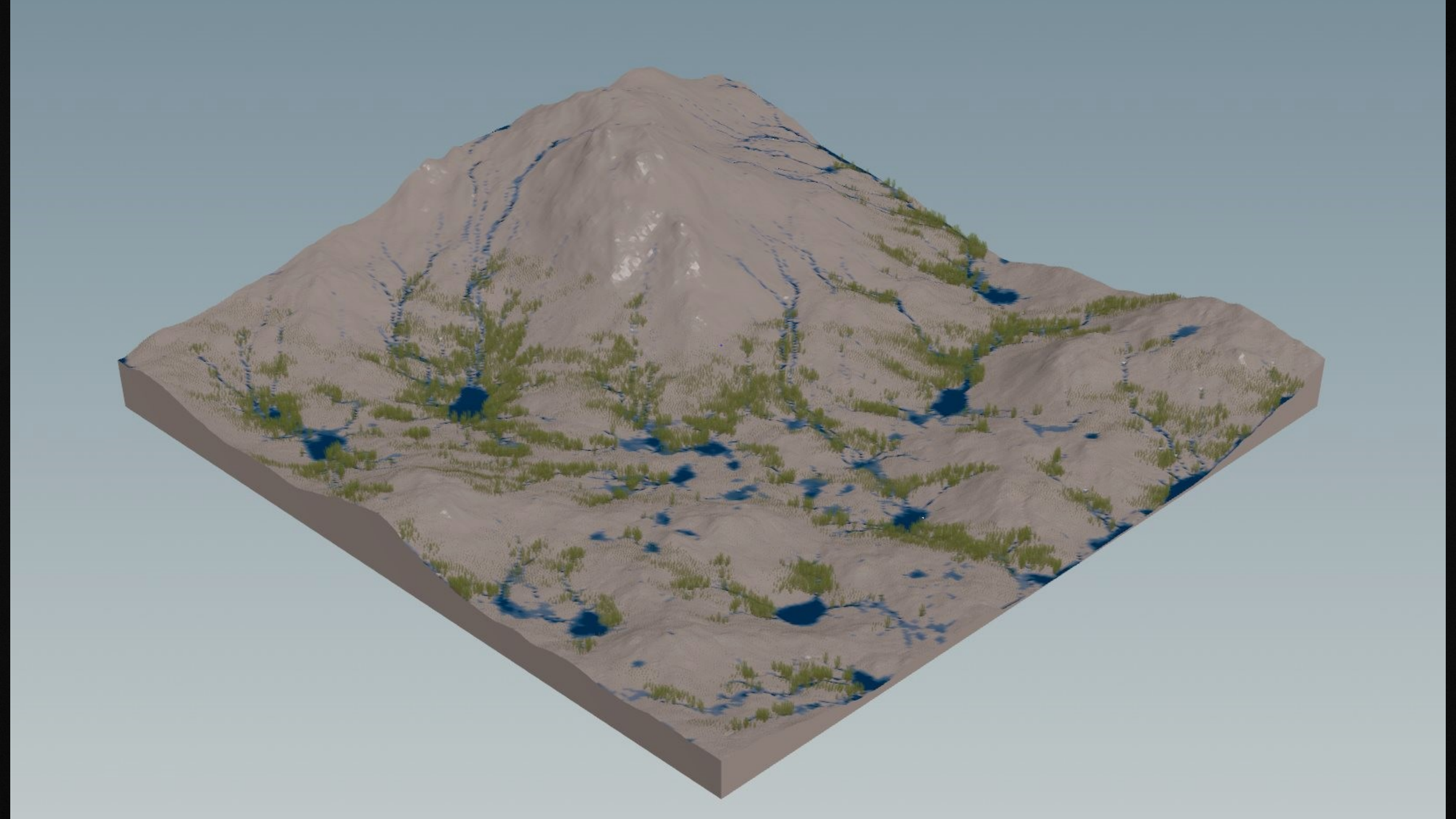

Day: 21

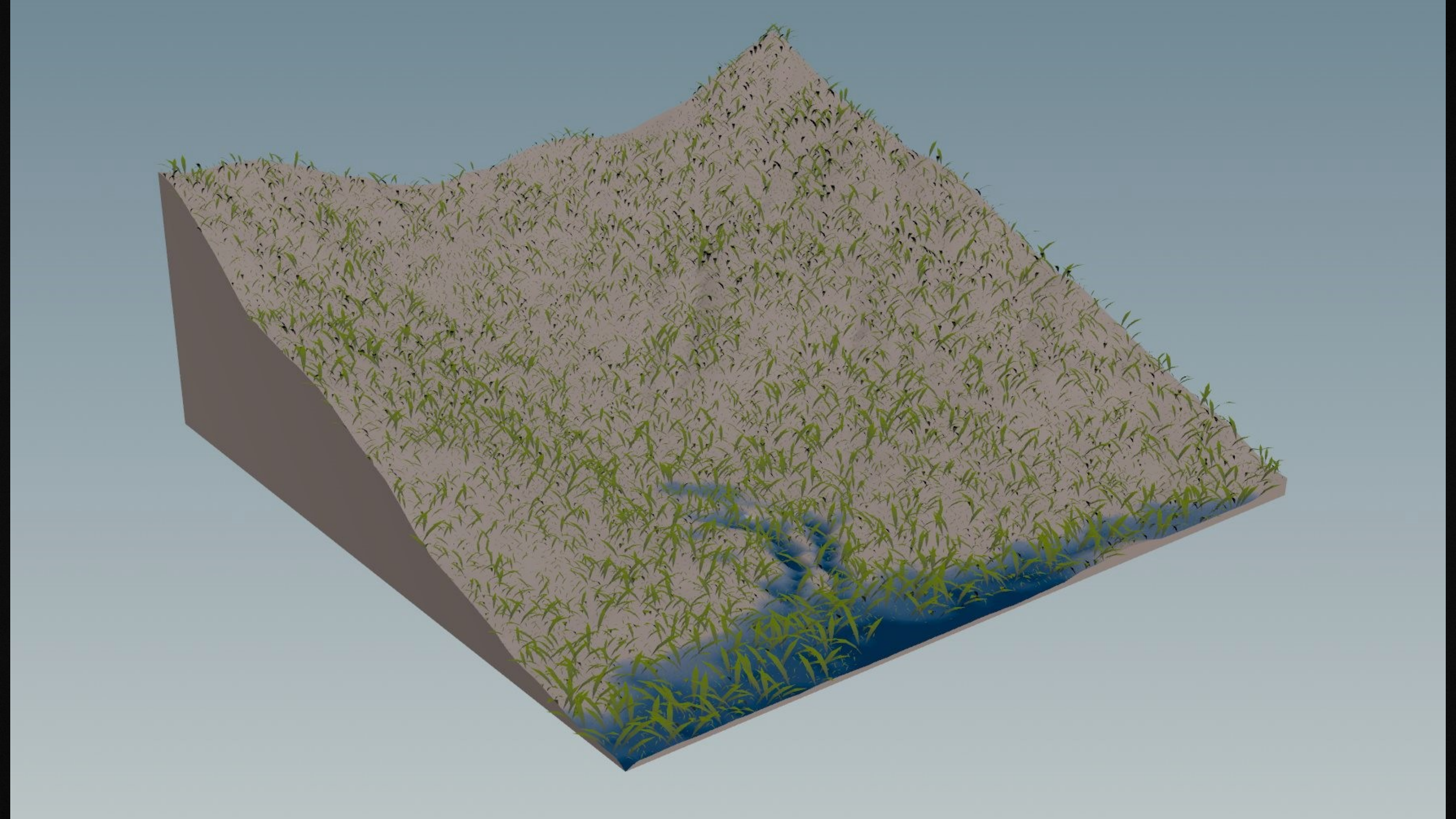

Day: 21






Day:100





今後の課題
●植物の世代交代をしたい

●土壌もしっかりやりたい

●軽量化したい

●パラメータわかりづらい

参考文献

・ [南川 1984] 南川隆雄. (1984). 種子発芽の生化学. 化学と生物. 22 巻. 2 号. 84-92.

・ [Weitbrecht et al. 2011] Weitbrecht, Karin & Mueller, Kerstin & Leubner, Gerhard. (2011). First off the mark: Early seed germination. Journal of experimental botany. 62. 3289-309.

・ [Baskin et al. 2009] M Baskin, Jerry & Baskin, Carol. (2003). Chapter 28 Classification, Biogeography, and Phylogenetic Relationships of Seed Dormancy. Seed Conservation: Turning Science into Practice.

・ [江刺 1977] 江刺洋司. (1977). 種子における休眠・発芽の制御機構. 化学と生物. 15 巻. 10号. 623-634.

・ [益守 1995] 益守眞也. (1995). マツ種子の休眠打破に伴う生理現象および貯蔵型 mRNAの貯蔵形態と挙動. 32-53.

・ [鈴木ら 1968] 鈴木善弘. 木本氏幹. (1968). 種子の熟度と発芽性および寿命1)

. 生物環境調節. 6巻. 1 号. 1-8.

実装の参考
・近藤宗平. (1974). ＤＮＡ修復と進化論的考察. 生物物理. 14巻. 3号. 118-126.